DONELLA H. MEADOWS

Autrice principale des *Limites à la croissance (dans un monde fini)*

POUR UNE PENSÉE SYSTÉMIQUE

PRÉFACE INÉDITE DE
DENNIS MEADOWS

Rue de l'échiquier

L'édition originale de ce livre a été publiée en anglais sous
le titre *Thinking in Systems: A Primer.*

Copyright © 2008 by Sustainability Institute
Published by permission of Chelsea Green Publishing.
All Rights Reserved.

© 2023, éditions Rue de l'échiquier, pour la traduction française

Une partie de cet ouvrage a été adaptée d'un article initialement publié sous le titre « Whole earth models and systems »
dans *Coevolution Quarterly* (été 1982). Une version antérieure du chapitre 6 a paru sous le titre « Places to intervene
in a system » dans *Whole Earth Review* (hiver 1997),
puis sous forme d'un article plus étoffé publié par le Sustainability Institute. Le chapitre 7 a d'abord été publié
sous le titre « Dancing with systems » dans *Whole Earth Review* (hiver 2001).

Éditions Rue de l'échiquier
16-18 quai de la Loire, 75019 Paris
www.ruedelechiquier.net

ISBN : 978-2-37425-378-7
Dépôt légal : janvier 2023

DONELLA H. MEADOWS

POUR UNE PENSÉE SYSTÉMIQUE

Traduit de l'anglais (États-Unis)
par Marianne Bouvier

Édition originale revue par Diana Wright,
du Sustainability Institute

Rue de l'échiquier

À Dana
(1941-2001)
et à toutes celles et tous ceux
qui apprendront d'elle

SOMMAIRE

Préface à l'édition française de Dennis Meadows

Note de l'autrice

Note de l'éditrice américaine

Introduction
Le prisme systémique

Première partie
STRUCTURE ET COMPORTEMENT D'UN SYSTÈME

Chapitre 1
Les bases

Chapitre 2
Courte visite au zoo des systèmes

Deuxième partie
LES SYSTÈMES ET NOUS

Chapitre 3
Pourquoi les systèmes fonctionnent si bien

Chapitre 4
Pourquoi les systèmes nous surprennent

Chapitre 5
Pièges et opportunités des systèmes

Troisième partie
SUSCITER LES CHANGEMENTS DANS LES SYSTÈMES COMME DANS NOTRE PHILOSOPHIE

Chapitre 6
Les points de levier, lieux d'intervention dans un système

Chapitre 7
Vivre dans un monde de systèmes

ANNEXES

Glossaire

Les principes systémiques en bref

Tirer parti des pièges systémiques

Lieux d'intervention dans un système
(par ordre croissant d'efficacité)

Conseils pour vivre dans un monde de systèmes

Équations de modélisation

Notes

Bibliographie et ressources

Remerciements de l'éditrice américaine

À propos de l’autrice
Postface de Bruno Lhoste
Postface de Baptiste Pérrissin-Fabert

PRÉFACE À L'ÉDITION FRANÇAISE DE DENNIS MEADOWS

En 1970, Donella Meadows a renoncé aux prémices d'une brillante carrière en biophysique pour se former à une méthodologie d'analyse systémique.

Après avoir obtenu son doctorat avec mention à Harvard, elle avait bénéficié d'une prestigieuse bourse pour étudier à la microseconde près la complexité de la dynamique enzymatique à l'aide d'appareils à balayage électronique extrêmement coûteux et sophistiqués. Mais ce domaine de recherche ne l'intéressait plus.

Nous rentrions tout juste d'un voyage sac au dos depuis le Royaume-Uni jusqu'au Sri Lanka. En douze mois, nous avions parcouru 100 000 kilomètres, arpenté treize nations, côtoyé d'innombrables cultures, langues et religions et traversé environ cinq siècles (mon estimation de la différence culturelle entre l'Afghanistan rural et l'Angleterre urbaine d'il y a cinquante ans). Nous avions été témoin de nombreux dysfonctionnements sociaux, politiques, environnementaux, économiques et psychologiques, dont beaucoup perduraient depuis des siècles, voire des millénaires. Donella a voulu comprendre les causes des problématiques sociales qu'elle avait constatées, et en étudier les conséquences et les solutions. Or la biophysique n'offrait aucun outil pour cela.

En revanche, les méthodologies de la pensée systémique semblaient prometteuses. Aussi m'a-t-elle rejoint au sein de l'équipe de dynamique des systèmes au Massachusetts Institute of Technology (MIT), où elle s'est formée à nos techniques durant trois mois intensifs. Puis elle a joué un rôle central dans l'étude que nous avons réalisée pour le Club de Rome sur la dynamique mondiale à long terme. Et elle a été la principale autrice du rapport qui en a résulté, *The Limits to Growth*.

Grâce au cheminement inhabituel par lequel elle s'était introduite dans ce champ de la connaissance, elle détenait un avantage unique sur la plupart des auteurs abordant la pensée systémique. Après s'être procuré des outils systémiques, ces derniers partaient en quête d'applications pertinentes. Cette approche a généré de nombreux ouvrages utiles. Toutefois, leur intérêt pour les problèmes étudiés découlait de leurs méthodologies. Tandis que les méthodologies de Donella découlaient de son intérêt pour les problèmes examinés.

Après avoir terminé notre projet au MIT, Donella et moi sommes entrés à Dartmouth College où nous avons dirigé un programme d'enseignement consacré aux méthodologies de la dynamique des systèmes. Durant ce cursus de plusieurs années spécialement conçu, nos étudiants acquéraient la capacité de représenter mathématiquement des problèmes complexes et de développer des modélisations informatiques débouchant sur des recommandations quant aux politiques à mettre en œuvre.

C'était tout à fait passionnant et stimulant. Mais Donella a rapidement compris que le temps et le coût nécessaires pour devenir un modélisateur professionnel réduiraient l'impact du projet. Comme si l'on formait des pilotes de chasse pour maintenir la paix.

L'impact serait bien plus important si l'on employait les ressources consacrées à l'instruction d'un pilote pour former des milliers de gens aux techniques de la négociation et du compromis. De même, un millier d'aide-soignants et d'infirmiers œuvrant dans les villages contribueront toujours davantage au bien-être de la population qu'un seul neurochirurgien expérimenté.

L'un des adages préférés de Donella était le suivant :

« Donnez du poisson à une population affamée, vous la nourrirez pendant une journée. Apprenez-lui à pêcher, vous la nourrirez pour toujours. »

Partant de ce constat, Donella s'est efforcée pendant plus d'une décennie de trouver la meilleure façon d'aider ses élèves à maîtriser la pensée systémique sans recourir à tout l'arsenal des modélisations informatiques. Durant cette période, elle fut à la fois enseignante, autrice et agricultrice. Ces différents rôles lui permirent de tester ses idées sur les gens et le monde naturel. Elle rejetait les approches qui ne fonctionnaient pas, et elle améliorait celles qui s'avéraient probantes. Ce faisant, elle a rédigé de nombreux documents témoignant de ses recherches.

Donella est décédée soudainement en 2001, avant d'avoir pu rassembler ses écrits sous la forme d'un livre. Nous avons toutefois l'immense chance que son amie et collègue de longue date, Diana Wright, ait eu l'envie, le temps et la capacité de terminer le travail de mon épouse.

Il en résulte un texte à nul autre pareil. Si vous tapez sur Google « liste des meilleurs ouvrages sur la pensée systémique », vous obtiendrez une profusion de résultats. Sur la plupart des sites proposant de telles listes, le livre de Donella figurera en première

position – dans de nombreuses traductions. Ce qui me facilite la tâche pour rédiger cette préface : nul besoin d'insister sur les mérites de cet ouvrage, qui ont déjà été largement reconnus et commentés.

Ce livre apprendra aux lecteurs assidus à réfléchir de manière systémique aux problèmes qui les préoccupent. Certes, cela ne garantira pas l'élimination desdits problèmes. Cependant, l'ignorance des causes et conséquences des nombreux dysfonctionnements de la société garantira à coup sûr que ceux-ci perdurent.

Donella adorait également ce proverbe :

« Mieux vaut allumer une bougie que maudire l'obscurité. »

Cet ouvrage vous apportera un nouvel éclairage sur la manière d'appréhender les systèmes contre lesquels vous n'avez sans doute pas d'autre solution que de pester.

Dennis Meadows,
octobre 2022

NOTE DE L'AUTRICE

Cet ouvrage résulte de la distillation de la sagesse de trente années de modélisation et d'enseignement systémiques menés par des dizaines de personnes créatives, dont la plupart ont initialement fait partie ou ont été influencées par l'équipe de dynamique des systèmes du Massachusetts Institute of Technology. Outre Jay Forrester qui en est le fondateur et la figure la plus éminente, mes professeurs (et étudiants devenus ensuite mes enseignants) ont été Ed Roberts, Jack Pugh, Dennis Meadows, Hartmut Bossel, Barry Richmond, Peter Senge, John Sterman et Peter Allen. Mais j'ai également emprunté ici au langage, aux idées, aux exemples, aux ouvrages et au savoir d'une large communauté d'intellectuels. J'exprime mon admiration et ma gratitude envers chacun de ses membres.

Par ailleurs, je me suis inspirée de penseurs issus de diverses disciplines qui, bien que n'ayant à ma connaissance jamais utilisé le moindre ordinateur pour simuler un système, sont des penseurs systémiques innés. Parmi eux figurent Gregory Bateson, Kenneth Boulding, Herman Daly, Albert Einstein, Garrett Hardin, Václav Havel, Lewis Mumford, Gunnar Myrdal, E. F. Schumacher, un certain nombre de cadres d'entreprises ainsi qu'une quantité de sources anonymes de sagesse ancienne, depuis les Indiens d'Amérique du Nord jusqu'aux soufis du Moyen-Orient. Étranges compagnons, me direz-vous. Mais la pensée systémique transcende les disciplines et les cultures, ainsi que l'histoire, lorsqu'elle est bien menée.

Après avoir parlé de transcendance, je dois également évoquer les querelles de chapelle. Si les analystes systémiques recourent à des concepts communs, ils n'en ont pas moins des personnalités tout à fait humaines. Aussi ont-ils formé de nombreuses écoles de pensée

systémique distinctes. Dans ce livre, j'emploie le langage et les symboles de la dynamique des systèmes de l'école dont je suis issue. Je n'y présente que les fondements de la théorie systémique, et non ses dernières avancées. En effet, je n'aborde pas les thèses les plus abstraites, et je ne m'intéresse à l'analyse que lorsqu'elle permet de résoudre des problèmes réels. Quand la branche abstraite de la théorie systémique en sera capable, ce qui arrivera certainement un jour, un autre ouvrage devra être rédigé.

Aussi dois-je vous avertir que ce livre, comme tous les autres, est partial et incomplet. Si vous voulez aller plus loin, vous pourrez découvrir bien plus de choses sur la pensée systémique que je ne l'expose ici. L'un de mes objectifs est d'éveiller votre intérêt. Et mon principal souci est de vous procurer les compétences élémentaires pour comprendre et manier les systèmes complexes, quand bien même votre formation théorique en la matière commencerait et se terminerait avec cet ouvrage.

Donella Meadows,
1993

NOTE DE L'ÉDITRICE AMÉRICAINE

En 1993, Donella (Dana) a terminé une première ébauche de l'ouvrage que vous avez entre les mains. Quoique non publié à l'époque, il a circulé pendant des années de manière informelle. Mais Dana est décédée subitement en 2001 avant de l'avoir finalisé. Au cours des années qui ont suivi, ses écrits ont manifestement continué de bénéficier à un large éventail de lecteurs. Dana était une scientifique, une autrice et l'une des meilleures communicantes dans le domaine de la modélisation systémique.

En 1972, Dana a été la principale autrice de *The Limits to Growth*, qui a remporté un grand succès et a été traduit dans de nombreuses langues. Les précautions qu'elle recommandait avec ses coauteurs sont aujourd'hui reconnues comme étant les avertissements les plus pertinents quant à la manière dont les modèles non durables pourraient, faute d'être réfrénés, occasionner des ravages à travers le globe. Cet ouvrage a fait la une des journaux du monde entier pour avoir affirmé qu'une croissance continue de la population et de la consommation pourrait nuire gravement aux écosystèmes et aux systèmes sociaux qui maintiennent la vie sur terre, et qu'une croissance économique illimitée finirait par perturber de nombreux systèmes locaux, régionaux et mondiaux. Les révélations contenues dans ce livre et ses mises à jour[1] font à nouveau les gros titres alors que nous atteignons le pic pétrolier, que nous nous heurtons aux réalités du changement climatique et que nous voyons une population mondiale de 6,6 milliards d'individus aux prises avec les conséquences implacables de la croissance physique.

En somme, Dana a introduit l'idée selon laquelle nous devons changer radicalement notre manière d'envisager le monde et ses

systèmes afin de rectifier le cap. Aujourd'hui, il est largement admis que la pensée systémique constitue un outil crucial pour répondre aux nombreux défis environnementaux, politiques, économiques et sociaux auxquels nous devons faire face à travers le monde. Qu'ils soient gros ou petits, les systèmes peuvent avoir des comportements similaires. Et la compréhension de ces derniers est sans doute notre meilleur espoir pour amorcer un changement durable à de multiples niveaux. Dana a rédigé ce livre afin de porter ce concept à la connaissance d'un plus large public, et c'est pourquoi nous avons estimé, avec mes collègues du Sustainability Institute, qu'il était temps de le publier à titre posthume.

Un ouvrage supplémentaire viendra-t-il en aide au monde ainsi qu'à vous, lecteur ? Je le pense. Peut-être que vous travaillez dans une entreprise (ou possédez une entreprise) et peinez à voir comment votre organisation pourrait contribuer à rendre le monde meilleur. Peut-être occupez-vous un poste de décideur qui voit les autres se rebiffer contre vos bonnes idées et vos bonnes intentions. Ou peut-être qu'en tant que responsable, vous vous êtes échiné à résoudre des problèmes importants dans votre entreprise ou votre communauté, avec pour seul résultat de voir d'autres défis émerger dans leur sillage. En tant que partisan du changement dans le fonctionnement d'une société (ou d'une famille), dans ses valeurs et ce qu'elle protège, vous avez peut-être vu des années de progrès balayées par quelques réactions intempestives. Ou bien peut-être qu'en tant que citoyen d'une société de plus en plus mondialisée, vous êtes tout simplement contrarié d'observer à quel point il est difficile d'introduire un changement positif et durable.

Si vous êtes dans l'un de ces cas, je pense que ce livre vous sera utile. Bien qu'il existe des dizaines de titres consacrés à la « modélisation des systèmes » et à la « pensée systémique », il manque clairement un ouvrage accessible et stimulant sur les systèmes et nous-mêmes – pourquoi nous les trouvons parfois si déroutants et comment nous pouvons apprendre à mieux les gérer et les remanier.

Quand Dana écrivait le présent ouvrage, elle venait de terminer la mise à jour de *The Limits to Growth*, vingt ans après sa première

parution, sous le titre *Beyond the Limits* (« au-delà des limites »). Elle était titulaire d'une bourse Pew de recherche sur la conservation et l'environnement, faisait partie du Comité pour la recherche et l'exploration de la National Geographic Society, et enseignait les systèmes, l'environnement et l'éthique à Dartmouth College, dans le New Hampshire. À travers tous les aspects de son activité, elle était immergée dans les évènements de l'époque. Elle avait conscience du fait que ces derniers constituaient le comportement apparent de systèmes souvent complexes.

Bien que le manuscrit original de Dana ait été revu et restructuré, une grande partie des exemples que vous trouverez dans ce livre sont issus de sa version initiale de 1993. Ils vous sembleront peut-être désuets, mais j'ai choisi de les garder car leurs enseignements sont toujours aussi pertinents à l'heure actuelle. Le début des années 1990 est marqué par la dislocation de l'Union soviétique ainsi que par des changements majeurs dans d'autres pays socialistes. L'Accord de libre-échange nord-américain (ALENA) est signé. L'armée irakienne envahit le Koweït, puis se retire en incendiant des puits de pétrole. En Afrique du Sud, Nelson Mandela est libéré et les lois sur l'apartheid sont abolies. Le leader syndical Lech Walesa est élu président de Pologne, et le poète Václav Havel, président de la Tchécoslovaquie. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publie son premier rapport d'évaluation, concluant que « les émissions résultant des activités humaines augmentent considérablement les concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre, renforçant l'effet de serre et entraînant un réchauffement supplémentaire de la surface de la Terre ». Et les Nations unies tiennent à Rio de Janeiro une conférence sur l'environnement et le développement.

À la même époque, Dana lit l'*International Herald Tribune* lors de ses déplacements professionnels. En une seule semaine, elle y repère de nombreux exemples de systèmes nécessitant une meilleure gestion ou une reconfiguration complète. Elle les trouve dans le journal parce qu'ils sont omniprésents dans notre entourage. Lorsque vous commencerez à voir que les évènements quotidiens relèvent de certaines tendances, et que ces tendances sont

symptomatiques d'une structure systémique sous-jacente, vous serez capable d'envisager de nouveaux modes de gestion et de nouvelles manières de vivre dans un monde de systèmes complexes. En publiant le manuscrit de Dana, j'espère accroître l'aptitude des lecteurs à comprendre les systèmes qui les entourent, à en parler et à amorcer des changements positifs.

J'espère que cette introduction accessible aux systèmes ainsi que notre manière de les appréhender constitueront un outil précieux dans un monde dont les comportements résultant de systèmes très complexes doivent changer rapidemment. Il s'agit d'un ouvrage simple à propos d'un monde complexe. Il est destiné à ceux qui souhaitent façonner un avenir meilleur.

Diana Wright,
2008

« Qu'on détruise une usine en laissant debout
le système de pensée qui l'a produite, celui-ci reconstruira
une nouvelle usine. Qu'une révolution détruise
un gouvernement en laissant intacts les modes de pensée
qui lui ont donné naissance, on les retrouvera
dans le gouvernement suivant. On parle beaucoup de *système*,
mais on ne sait pas de quoi on parle. »

Robert Pirsig,
Traité du zen et de l'entretien des motocyclettes

INTRODUCTION

LE PRISME SYSTÉMIQUE

> « Les dirigeants sont aux prises non pas à des problèmes indépendants les uns des autres, mais à des situations dynamiques qui relèvent de systèmes complexes de problèmes changeants qui interagissent entre eux. Je qualifie ces situations de pagailles. […] Les dirigeants ne résolvent pas des problèmes, ils gèrent des pagailles. »
> *Russell Ackoff, théoricien des organisations*[1]

Au début de mon cours sur les systèmes, j'apporte souvent un Slinky. Si vous avez grandi sans ce jouet qu'on appelle aussi Ondamania, il s'agit d'un ressort long et souple que l'on peut faire osciller de haut en bas, passer d'une main à l'autre ou faire dévaler un escalier.

Je pose l'Ondamania sur l'une de mes paumes tournées en l'air. Avec les doigts de l'autre main, je saisis les spires au milieu du ressort par le haut. Puis je retire la main du bas. Suspendue à mes doigts, la partie inférieure du Slinky descend, remonte et poursuit son mouvement de yoyo. Puis je pose la question suivante à mes étudiants :

« Qu'est-ce qui l'a fait rebondir ainsi ?

– Votre main. Vous avez retiré la main », répondent-ils.

J'attrape alors la boîte dans laquelle se trouvait le ressort, et je la place de la même manière sur ma paume tout en la tenant avec les doigts de l'autre main. D'un geste aussi théâtral qu'il m'est possible, je retire cette dernière de sous la boîte.

Rien ne se passe. Bien entendu, la boîte reste suspendue entre mes doigts.

« Je renouvelle ma question. Qu'est-ce qui a fait rebondir l'Ondamania ? »

La réponse réside clairement dans l'Ondamania lui-même. Les mains qui le manipulent répriment ou libèrent un comportement qui est latent dans la structure du ressort.

C'est une notion centrale de la théorie systémique.

Dès lors que nous percevons la relation entre structure et comportement, nous commençons à saisir comment les systèmes fonctionnent, pourquoi ils génèrent de mauvais résultats, et comment nous pouvons rectifier leurs schémas comportementaux. À mesure que notre monde change rapidement et devient plus complexe, la pensée systémique nous aide à gérer, adapter et entrevoir le large éventail de choix qui s'offrent à nous. Ce mode de réflexion nous procure la liberté d'identifier les causes profondes des problèmes et de découvrir de nouvelles perspectives.

Mais qu'est-ce qu'un système ? C'est un ensemble de choses – personnes, cellules, molécules ou autres – qui sont reliées entre elles de manière à générer leur propre schéma comportemental au fil du temps. Le système est susceptible d'être bouleversé, contraint, déclenché ou entraîné par des forces extérieures. Mais la manière dont le système répond à ces forces est propre à lui-même, et cette réponse est rarement simple dans le monde réel.

Lorsqu'il s'agit de l'Ondamania, cette idée est relativement facile à comprendre. Lorsqu'il s'agit d'individus, d'entreprises, de villes ou d'économies, elle peut faire figure d'hérésie. Dans une large mesure, le système génère son propre comportement ! Un évènement extérieur peut provoquer ce comportement, mais ce même évènement appliqué à un autre système entraînera un résultat différent.

Réfléchissez un moment aux implications de cette idée :

• Les dirigeants politiques n'occasionnent pas les récessions ou les expansions économiques. Ces fluctuations sont inhérentes à la structure de l'économie de marché.

• Une entreprise perd rarement des parts de marché à cause de ses concurrents. Ces derniers peuvent en retirer des avantages, mais c'est l'entreprise qui génère ses propres pertes, du moins en partie, par le biais de ses politiques commerciales.

• Les nations exportatrices de pétrole ne sont pas les seules responsables des hausses de prix. Leurs actions seules ne pourraient entraîner une hausse mondiale des prix et le chaos économique si les politiques des pays importateurs en termes de consommation, de prix et d'investissements n'avaient pas rendu leurs économies vulnérables aux interruptions d'approvisionnement.

• Ce n'est pas le virus de la grippe qui vous attaque, mais c'est vous qui créez les conditions pour qu'il prospère dans votre organisme.

• La dépendance à la drogue n'est pas imputable à un individu et personne, ni par la dureté ni par l'amour, ne parviendra à guérir un toxicomane – même pas lui-même. Ce n'est qu'en envisageant la toxicomanie comme faisant partie d'un ensemble plus large d'influences et de problèmes sociétaux que l'on peut s'atteler à y remédier.

Les énoncés de ce type ont quelque chose de profondément troublant. Mais quelque chose d'autre en eux relève du simple bon sens. Ma thèse est que ces deux quelque chose – une résistance et une adhésion aux principes systémiques – résultent de deux sortes d'expériences humaines qui sont familières à chacun.

D'un côté, on nous a appris à analyser, à recourir à notre aptitude rationnelle pour trouver des liens directs de cause à effet, à décortiquer les choses en petits éléments compréhensibles, à résoudre les problèmes en agissant sur le monde qui nous entoure ou en le contrôlant. Cette éducation, à l'origine de la majeure partie du pouvoir personnel et sociétal, nous incite à considérer les chefs d'État, les concurrents, l'OPEP, la grippe et la drogue comme la source de nos problèmes.

D'un autre côté, bien avant d'avoir été éduqués à l'analyse rationnelle, nous avons tous eu affaire aux systèmes complexes. Nous sommes des systèmes complexes – nos propres corps sont de superbes exemples de complexité intégrée, interdépendante, auto-

entretenue. Chaque personne que nous rencontrons, chaque organisation, animal, jardin, arbre ou forêt est un système complexe. Nous avons élaboré intuitivement, sans analyse, souvent sans le moindre mot, une compréhension empirique de la manière dont ces systèmes fonctionnent et dont nous pouvons fonctionner avec eux.

Avec ses ordinateurs et ses équations, la théorie systémique moderne occulte le fait qu'elle manipule des vérités connues à un certain niveau par tout un chacun. En effet, il est souvent possible de traduire directement le jargon systémique par un vieil adage de la sagesse populaire.

Du fait des délais de rétroaction au sein des systèmes complexes, lorsqu'un problème devient manifeste, il est parfois déjà extraordinairement difficile à résoudre.

Mieux vaut prévenir que guérir.

Selon le principe d'exclusion compétitive, lorsqu'une boucle de rétroaction amplificatrice récompense le lauréat d'un concours en lui fournissant les moyens de remporter les concours suivants, il en résulte l'élimination de la plupart des concurrents.

Car à quiconque a, il sera donné ; et à celui qui n'a pas, cela même qu'il a sera ôté. (Marc 4, 25)

Ou bien :

On ne prête qu'aux riches.

Un système diversifié comportant de multiples voies et redondances est plus stable et moins vulnérable aux chocs externes qu'un système uniforme et peu diversifié.

Ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier.

Depuis la révolution industrielle, la société occidentale privilégie la science, la logique et le réductionnisme au détriment de l'intuition

et de l'approche holistique. Tant sur le plan psychologique que politique, nous préférons largement supposer que la cause d'un problème se trouve « là-bas » qu'« ici même ». Nous avons une tendance presque irrésistible à rejeter la faute sur quelque chose ou quelqu'un d'autre, à nous dégager de toute responsabilité, et à rechercher le bouton de réglage, le produit, la pilule, la solution technique qui éliminera le problème.

Des problèmes majeurs ont été résolus en se concentrant sur des agents extérieurs – prévenir la variole, accroître la production alimentaire, déplacer de lourdes charges et de nombreuses personnes rapidement sur de longues distances. Mais parce qu'elles sont imbriquées dans des systèmes plus larges, certaines de nos « solutions » ont généré d'autres difficultés. Et certains problèmes, ceux qui étaient les plus enracinés dans la structure interne de systèmes complexes, les véritables semeurs de pagaille, ont refusé de disparaître.

La faim, la pauvreté, la dégradation environnementale, l'instabilité économique, le chômage, les maladies chroniques, la toxicomanie et la guerre, par exemple, persistent en dépit de l'aptitude analytique et du génie technique qui ont été mobilisés pour les éradiquer. Personne ne crée délibérément ces problèmes, personne ne souhaite qu'ils persistent, mais ils persistent cependant. La raison en est qu'il s'agit de problèmes intrinsèquement systémiques – des comportements indésirables caractéristiques des structures qui les génèrent. Ils ne capituleront que si nous reconquérons notre intuition, si nous cessons de rejeter la faute sur les autres, si nous envisageons le système comme la source de ses propres problèmes, et si nous trouvons le courage et la sagesse de le *restructurer*.

Évident. Quoique subversif. Une ancienne façon de voir les choses. Quoique nouvelle à certains égards. Troublante, parce que nous devons *faire les choses*, ou du moins *les voir* et *y réfléchir* de manière différente.

Cet ouvrage traite de cette autre manière de voir et de penser. Il est destiné aux gens que le mot « système » et le champ de l'analyse systémique pourraient laisser sceptiques, même s'ils ont pratiqué la

pensée systémique toute leur vie. Je m'en suis tenue à un propos non technique afin de montrer à quel point vous pouvez avancer loin dans la compréhension des systèmes sans recourir aux mathématiques ou à l'informatique.

J'ai abondamment recouru aux diagrammes et aux courbes, car il est difficile de parler des systèmes uniquement avec des mots. Par construction, les mots et les phrases ne viennent qu'un par un dans une succession logique linéaire. Or les systèmes opèrent tous en même temps. Ils ne sont pas reliés dans une seule direction, mais dans de nombreuses directions à la fois. Pour en discuter de manière appropriée, il est nécessaire d'employer un langage qui partage certaines des propriétés des phénomènes abordés.

Pour cela, les images fonctionnent mieux que les mots, car il est possible de voir simultanément tous les éléments. Je détaillerai progressivement les représentations des systèmes en commençant par des systèmes très simples. Selon moi, vous comprendrez aisément ce langage graphique.

Je commencerai par les bases, à savoir la définition d'un système et sa décomposition en parties (de manière réductionniste et non holistique). Puis je rassemblerai ces dernières pour montrer comment elles interagissent pour former l'unité fonctionnelle élémentaire d'un système : la boucle de rétroaction.

Ensuite, je vous présenterai un « zoo » systémique – une collection de types de systèmes courants et intéressants. Vous observerez comment certaines de ces créatures se comportent, pourquoi elles agissent ainsi, et où vous pouvez les trouver. Vous les reconnaîtrez ; ces systèmes se trouvent tout autour de vous et même en vous.

À partir de quelques-uns des « animaux » du zoo – un ensemble d'exemples spécifiques –, j'expliquerai comment et pourquoi les systèmes fonctionnent aussi magnifiquement, et j'exposerai les raisons pour lesquelles ils nous surprennent et nous déconcertent si souvent. Je montrerai pourquoi, même si tous les intervenants et éléments d'un système agissent consciencieusement et rationnellement, le cumul de ces actions bien intentionnées aboutit trop souvent à un résultat tout à fait désastreux. Et pourquoi les

choses surviennent si souvent beaucoup plus rapidement ou lentement que tout le monde le pensait. Et pourquoi vous pouvez faire une chose qui a toujours fonctionné et découvrir soudain, à votre grande déception, que votre action n'est plus efficace. Enfin, pourquoi un système peut subitement, sans crier gare, adopter un comportement inédit.

Cette discussion nous amènera à étudier les problèmes courants sur lesquels achoppe régulièrement la communauté des penseurs systémiques lorsqu'elle travaille avec des entreprises et des gouvernements, des économies et des écosystèmes, la physiologie et la psychologie. « Voici encore un exemple de tragédie des communs », constatons-nous lorsque nous nous penchons sur un système de répartition des ressources en eau entre plusieurs communautés, ou des ressources financières entre plusieurs établissements scolaires. Ou bien nous identifions une « érosion des objectifs » lorsque nous examinons les règles commerciales et les incitations qui favorisent ou entravent le développement de nouvelles technologies. Ou nous observons une « résistance aux politiques » lorsque nous explorons le pouvoir de décision et la nature des relations au sein d'une famille, d'une communauté ou d'une nation. Ou encore nous remarquons une « addiction » – qui peut être causée par bien d'autres agents que la caféine, l'alcool, la nicotine ou les stupéfiants.

Les penseurs systémiques qualifient d'« archétypes » ces structures répandues qui génèrent des comportements caractéristiques. Lorsque j'ai commencé à réfléchir à ce livre, je les ai appelés « pièges systémiques ». Puis j'y ai adjoint le mot « opportunités », car ces archétypes, qui entraînent les problèmes figurant parmi les plus radicaux et potentiellement les plus dangereux, peuvent aussi être transformés, avec un peu de connaissance des systèmes, de manière à produire des comportements plus désirables.

À partir de là, je décrirai ce que vous et moi avons la possibilité de faire pour restructurer les systèmes au sein desquels nous vivons. En effet, nous pouvons apprendre à rechercher les points de levier qui occasionneront le changement.

Enfin, je conclurai par les plus grandes leçons qui soient : celles résultant de la sagesse partagée par la plupart des penseurs systémiques que e connais. Et pour qui veut aller plus loin dans l'exploration de la pensée systémique, les annexes comportent un glossaire, une liste récapitulative des principes systémiques, les équations relatives aux modèles décrits dans la première partie de cet ouvrage, ainsi qu'une bibliographie.

Lorsque notre petite équipe de chercheurs a déménagé du Massachusetts Institute of Technology à Dartmouth College il y a de cela des années, l'un des professeurs d'ingénierie de notre nouvelle université nous a longuement observés lors de séminaires avant de passer nous voir dans nos bureaux. « Vous êtes différents, nous a-t-il dit. Vous posez d'autres types de questions. Vous voyez des choses que je ne vois pas. En quelque sorte, vous abordez le monde d'une manière différente. Comment ? Pourquoi ? »

C'est précisément ce que j'espère transmettre tout au long de ce livre, et plus particulièrement dans sa conclusion. Je ne pense pas que le point de vue systémique soit meilleur que l'approche réductionniste. Je pense qu'il est complémentaire, et par conséquent révélateur. Vous verrez certaines choses à travers le prisme de l'œil humain, d'autres choses à travers la lentille d'un microscope, d'autres à travers l'objectif d'un télescope, et d'autres encore à travers le prisme de la théorie systémique. Tout ce que vous observerez à travers chacun d'eux est vraiment là. Chaque manière de voir complète un peu plus notre connaissance du monde merveilleux dans lequel nous vivons.

Alors que le monde est de plus en plus complexe, peuplé, interconnecté, interdépendant, et qu'il change plus rapidement que jamais, plus nous aurons de manières de l'appréhender, mieux ce sera. Or le prisme de la pensée systémique nous permet de nous réapproprier notre intuition concernant les systèmes dans leur ensemble, ainsi que :

- d'affiner notre aptitude à en comprendre les parties,
- de repérer les interactions,
- de nous demander « Et si cela se produisait, que se passerait-il ? » à propos des comportements futurs, et

• de reconfigurer les systèmes avec courage et créativité.

Grâce à nos perspectives systémiques, nous serons capables de faire la différence en nous-mêmes et dans le monde qui nous entoure.

INTERLUDE

Les Aveugles et la question de l'éléphant

« Il était une ville, au-delà de Ghor, dont tous les habitants étaient aveugles.

Un roi, ses courtisans et ses hommes d'armes arrivèrent un jour à proximité. Ils établirent un camp dans le désert, aux portes de la ville.

Ce roi possédait un éléphant qu'il lançait dans la bataille pour terrifier et écraser l'ennemi.

Nos aveugles brûlaient de voir l'éléphant. Quelques-uns se précipitèrent comme des idiots à sa découverte. Puisqu'ils ne savaient pas quelle forme ni quelle allure *cela* avait, ils cherchèrent à l'aveuglette, recueillant des informations en palpant telle ou telle partie du corps de l'éléphant.

Chacun crut avoir découvert ce que c'était parce qu'il en avait touché un élément. […]

Celui dont la main avait atteint une oreille [dit :] "C'est une grande chose rugueuse, large et ample. Ça ressemble à un tapis. "

"Moi, je sais de quoi il s'agit : c'est une sorte de tuyau, affreux et destructeur !" s'exclama celui qui avait posé la main sur la trompe.

"C'est une sorte de pilier vivant", déclara celui qui avait palpé une patte.

Chacun avait touché une partie du corps de l'éléphant. Tous l'avaient mal perçue[2]. »

Jadis, les soufis transmettaient ce conte afin d'enseigner une leçon simple que nous ignorons souvent : on ne peut

appréhender le comportement d'un système en se bornant à connaître les éléments qui le constituent.

PREMIÈRE PARTIE

STRUCTURE ET COMPORTEMENT D'UN SYSTÈME

1.
Les bases

« Je n'ai jamais vu de problème, si compliqué soit-il, qui lorsqu'on l'aborde correctement ne devienne encore plus compliqué. »
Paul Anderson[1]

Plus que la somme de ses parties

Un **système*** ne se résume pas à une simple accumulation de choses, mais désigne un ensemble d'éléments interdépendants qui sont organisés de manière cohérente pour accomplir quelque chose. En examinant attentivement cette définition, vous remarquerez qu'un système doit comprendre trois sortes de composantes : des *éléments*, des *interactions* et une *fonction* ou un *objectif*.

Par exemple, les éléments de votre système digestif sont les dents, des enzymes, l'estomac et les intestins qui interagissent par le biais du flux sanguin et d'un ensemble élaboré de signaux chimiques régulateurs. La fonction de ce système est de décomposer la nourriture en nutriments de base et de les transférer dans la circulation sanguine (un autre système) tout en éliminant les déchets inutilisables.

Une équipe de foot est un système dont les principaux éléments sont les joueurs, l'entraîneur, le terrain et le ballon. Ses moyens d'interaction sont les règles du jeu, la stratégie du coach, la communication entre les joueurs et les lois physiques régissant le déplacement du ballon et des sportifs. Son objectif est de remporter

des matchs, ou de s'amuser, ou de faire de l'exercice, ou d'amasser des millions de dollars, ou tout cela à la fois.

Une école est également un système, de même qu'une ville, une usine, une entreprise ou l'économie d'un pays. Un animal est un système. Un arbre est un système, tandis qu'une forêt constitue un système plus large englobant les sous-systèmes que sont les végétaux et les animaux. La Terre est un système, de même que le système solaire ou une galaxie. Les systèmes sont eux-mêmes imbriqués dans des systèmes qui sont à leur tour enchâssés dans d'autres systèmes.

Y a-t-il des choses qui ne sont pas des systèmes ? Oui : un conglomérat dénué de toute interaction ou fonction. Du sable dispersé au hasard sur une route ne constitue pas en lui-même un système. Vous aurez beau en ajouter ou en retirer, vous n'aurez toujours que du sable sur la route. En revanche, si vous ajoutez ou retirez des joueurs à une équipe de foot ou des éléments à votre système digestif, vous n'aurez plus le même système.

Lorsqu'elle meurt, une créature vivante perd sa qualité de système. Les multiples interactions qui la maintenaient ont cessé. Elle disparaît donc, bien que sa matière fasse encore partie du système alimentaire. Certains disent qu'un quartier ancien où les gens se connaissent et communiquent régulièrement constitue un système social, tandis qu'un immeuble neuf habité par de parfaits étrangers ne l'est pas – jusqu'à ce que des relations se nouent et qu'un système se forme.

Comme le montrent ces exemples, un système possède une intégrité et renferme un ensemble de mécanismes qui contribuent activement au maintien de cette intégrité. Un système a la capacité de se transformer, de s'adapter, de réagir à des évènements, de tendre vers des objectifs, de réparer ses blessures et de contribuer à sa propre survie à l'instar d'un être vivant, même s'il est uniquement composé d'éléments inertes. Il est capable de s'auto-organiser, et souvent de s'autoréparer, du moins après certains types de perturbations. Il est résilient, et dans la plupart des cas susceptible d'évoluer. Enfin, il peut donner naissance à d'autres systèmes totalement nouveaux, jamais imaginés auparavant.

> **Un système est plus que la somme de ses parties.**
> Il peut s'adapter, faire preuve de dynamisme, tendre vers un objectif, veiller à sa propre préservation, et parfois évoluer.

Au-delà des joueurs, observez les règles

« Vous pensez que parce que vous comprenez "un", vous devez nécessairement comprendre "deux" puique un et un font deux. Mais vous oubliez que vous devez aussi comprendre "et".
Précepte soufi

Les éléments d'un système sont souvent les plus faciles à remarquer, car la plupart sont des choses visibles, tangibles. Ainsi, les éléments qui constituent un arbre sont ses racines, son tronc, ses branches et ses feuilles. En l'examinant de plus près, vous distinguerez différents types de cellules : celles des vaisseaux transportant les fluides à partir des racines et des feuilles, les chloroplastes, etc. Le système appelé université comprend des bâtiments, des étudiants, des professeurs, des administrateurs, des bibliothèques, des livres, des ordinateurs – et je pourrais continuer en décrivant de quoi toutes ces choses sont faites. Les éléments d'un système ne sont pas nécessairement des objets physiques. Ils sont parfois immatériels. Dans le cas d'une université, la fierté d'appartenance et les performances académiques sont deux éléments immatériels du système qui peuvent s'avérer très importants. Lorsque vous commencez à énumérer les éléments d'un système, le processus est quasiment sans fin. Vous pouvez diviser chacun d'eux en sous-éléments, puis en sous-sous-éléments. Assez rapidement, vous perdez le système de vue. Comme dit le proverbe, les arbres cachent la forêt.

Avant d'aller trop loin, mieux vaut arrêter de disséquer les éléments pour s'intéresser à leurs *interactions*, c'est-à-dire aux

relations qui les maintiennent ensemble.

RÉFLÉCHISSEZ-Y

Comment savoir si vous avez affaire à un système ou juste à une accumulation de choses :

A) Pouvez-vous identifier ses parties ?... et...

B) ces parties influent-elles les unes sur les autres ?... et...

C) ensemble, ces parties génèrent-elles un effet différent de celui qu'aurait chacune d'elles ?... et éventuellement...

D) l'effet, ou comportement au fil du temps, persiste-t-il dans diverses circonstances ?

Au sein du système de l'arbre, les interactions sont les flux physiques et les réactions chimiques qui régissent les processus métaboliques – les signaux qui permettent à une partie de réagir à ce qui se passe dans une autre partie. Par exemple, quand les feuilles viennent à manquer d'eau par une journée ensoleillée, la baisse de pression dans les vaisseaux qui la transportent incite les racines à en prélever davantage dans le sol. Inversement, quand ce dernier devient trop sec, le manque de pression indique aux feuilles qu'elles doivent fermer leurs pores afin de ne pas perdre davantage de cette précieuse eau.

Lorsque les jours raccourcissent dans les zones tempérées, les arbres à feuilles caduques émettent des signaux chimiques qui poussent les nutriments à migrer depuis les feuilles vers le tronc et les racines, affaiblissant ainsi les branches et faisant tomber les feuilles. Il semble même y avoir des messages qui incitent certains arbres à produire des substances répulsives ou à rigidifier leurs parois cellulaires lorsqu'une partie de la plante est attaquée par des insectes. Nul ne comprend toutes les relations qui permettent aux arbres de faire ce qu'ils font. Ce manque de connaissances n'a rien de surprenant. Il est plus facile de s'informer sur les éléments d'un système que sur leurs interactions.

Dans le système de l'université, les interactions comprennent les critères d'admission, les règles d'obtention des diplômes, les examens et les notes, les budgets et les flux financiers, les rumeurs, et plus important encore la transmission du savoir qui est théoriquement l'objectif du système dans son ensemble.

Certaines interactions consistent en de véritables flux physiques, comme la circulation de l'eau dans le tronc de l'arbre ou les déplacements des étudiants dans l'université. Mais bien d'autres sont des flux d'informations – des signaux adressés à des points de décision ou d'action au sein du système. Ces types d'interactions sont souvent plus difficiles à voir ; toutefois, le système les révèle à qui les cherche. Pour choisir leurs cours, les étudiants se renseignent de manière informelle sur la probabilité de décrocher une bonne note. Pour décider quoi acheter, les consommateurs tiennent compte de leurs revenus, de leur épargne, des taux de crédit, des stocks dont ils disposent à la maison, des prix et de la disponibilité des produits. Quant aux gouvernements, ils doivent s'informer sur les caractéristiques et l'ampleur de la pollution des eaux afin d'instaurer une règlementation judicieuse en la matière. (À noter que la connaissance de l'existence d'un problème peut être nécessaire mais non suffisante pour déclencher une action – l'information sur les ressources, les incitations et leurs répercussions a également son importance.)

Les interactions en matière d'information sont difficiles à percevoir, mais les *fonctions* ou *objectifs* le sont plus encore. Si l'utilité ou la visée d'un système n'est pas toujours exprimée de manière explicite, que ce soit par oral ou par écrit, elle transparaît dans son fonctionnement. Par conséquent, le meilleur moyen de découvrir l'objectif d'un système est d'observer pendant un temps comment il se comporte.

> **Nombreuses sont les interactions au sein d'un système qui prennent la forme de flux d'informations.**
> L'information maintient le système et joue un rôle important pour déterminer son mode de fonctionnement.

Lorsqu'une grenouille se tourne vers la droite et attrape une mouche, puis vers la gauche et attrape une autre mouche, puis fait demi-tour et attrape une troisième mouche, son but n'est pas de se tourner vers la gauche, la droite ou l'arrière, mais d'attraper des mouches. Lorsqu'un gouvernement prétend s'intéresser à la protection de l'environnement mais lui consacre peu d'argent ou d'efforts, son but n'est pas véritablement de préserver l'environnement. Les objectifs se déduisent du comportement, et non des déclarations d'intention.

La fonction d'un thermostat est de maintenir un bâtiment à une température donnée. L'une des fonctions d'une plante est de produire des graines afin de générer d'autres plantes. L'une des fonctions d'une économie nationale est, si l'on en juge par son comportement, de continuer à croître. Une fonction importante de la plupart des systèmes est d'assurer leur propre perpétuation.

UN PEU DE TERMINOLOGIE

Le terme *fonction* est généralement employé pour un système non humain, et le terme *objectif* pour un système humain. Toutefois, cette distinction n'a rien d'absolu, sachant que de nombreux systèmes sont constitués à la fois d'éléments humains et non humains.

L'objectif d'un système n'est pas nécessairement humain et ne correspond pas toujours au but recherché par chaque acteur dudit système.

En fait, l'un des aspects les plus contrariants des systèmes est que les objectifs de ses sous-unités peuvent aboutir à un comportement

global dont personne ne veut. Bien que nul n'ait l'intention de créer une société minée par la criminalité et la drogue, considérez la combinaison des objectifs des acteurs impliqués et les actions qui en résultent :

- Les gens désespérés veulent être soulagés rapidement de leur souffrance psychologique ;
- Les cultivateurs, les grossistes et les banquiers cherchent à gagner de l'argent ;
- Les dealers sont moins attachés aux lois que les policiers chargés de les faire respecter ;
- Les gouvernements interdisent les substances nocives et recourent à la police pour appliquer la loi ;
- Les gens riches vivent à proximité de gens pauvres ;
- Les non-drogués cherchent davantage à se protéger qu'à favoriser la guérison des toxicomanes.

Tous ces paramètres résultent en un système dans lequel il est extrêmement difficile d'éradiquer la criminalité et la toxicomanie.

Des systèmes peuvent être imbriqués dans d'autres systèmes, et par conséquent des objectifs dans d'autres objectifs. Le but d'une université est de découvrir et de préserver des connaissances et de les transmettre aux nouvelles générations. Au sein de l'institution, le but de tel étudiant sera d'obtenir de bonnes notes, celui de tel professeur de se faire titulariser, et celui de tel administrateur d'équilibrer son budget. N'importe lequel de ces sous-objectifs risque d'entrer en conflit avec l'objectif global – l'étudiant pourrait tricher, l'enseignant délaisser ses élèves afin de publier des articles, l'administrateur réduire ses charges en virant des profs. Maintenir les sous-objectifs en harmonie avec la visée globale constitue une fonction essentielle d'un système efficace. J'y reviendrai quand nous aborderons les hiérarchies.

Afin d'appréhender l'importance relative des éléments, des interactions et des objectifs d'un système, imaginez que vous les remplaciez l'un après l'autre. C'est généralement le remplacement des éléments qui a le moins d'effet sur le système. Si vous changez tous les joueurs d'une équipe de foot, elle sera toujours perçue comme une équipe de foot. (Peut-être sera-t-elle bien meilleure ou

plus mauvaise – les différents éléments d'un système ont parfois leur importance.) Les cellules d'un arbre sont remplacées en permanence et ses feuilles chaque année, mais l'arbre reste le même. La plupart des cellules de votre corps sont remplacées au bout de quelques semaines, mais c'est toujours votre corps. Les étudiants d'une université se renouvellent continuellement, ainsi que les professeurs et les administrateurs à un rythme moins rapide, mais elle reste une université. C'est d'ailleurs toujours la même université, se distinguant des autres de manière subtile, tout comme General Motors et le Congrès des États-Unis conservent leur identité même si tous leurs membres changent. Un système continue généralement à être lui-même, ne se transformant que lentement ou pas du tout, même en cas de substitution de tous ses éléments – à condition que ses interactions et ses objectifs restent intacts.

En revanche, si les interactions changent, le système risque d'être totalement transformé – jusqu'à devenir méconnaissable, même si l'équipe conserve tous ses joueurs. Si vous remplacez les règles du foot par celles du basket, la donne changera du tout au tout. Si vous modifiez les interactions d'un arbre – qui, par exemple, au lieu d'absorber du dioxyde de carbone et de rejeter de l'oxygène, fait l'inverse –, ce ne sera plus un arbre, mais un animal. Si, dans une université, les étudiants notaient les professeurs, ou que les débats se résolvaient par la force et non plus par la raison, l'institution devrait prendre un nouveau nom. Elle pourrait certes présenter un intérêt, mais ce ne serait plus une université. En modifiant les interactions au sein d'un système, on risque de le transformer radicalement.

Changer de fonction ou d'objectif peut également s'avérer radical. Et si vous gardiez les joueurs et les règles du jeu en modifiant le but – perdre au lieu de gagner, par exemple ? Ou si la fonction d'un arbre était non pas de survivre et de se reproduire, mais d'absorber tous les nutriments du sol et de croître sans limites ? Les hommes ont conçu pour l'université bien d'autres objectifs que celui de diffuser le savoir – faire de l'argent, endoctriner les gens, remporter des matchs de foot. Le changement d'objectif modifie profondément un système, même si la totalité de ses éléments et de ses interactions reste identique.

Se demander ce qui est le plus important dans un système – ses éléments, ses interactions ou ses objectifs – est une question non systémique. Tous les trois sont essentiels. Tous les trois interagissent. Néanmoins, la composante la moins flagrante du système – sa fonction ou son objectif – détermine souvent son comportement de la manière la plus cruciale. Les interactions sont également primordiales – leur modification transforme en général le comportement du système. Les éléments, que nous remarquons le plus facilement, ont souvent (mais pas toujours) une moindre importance dans la définition des caractéristiques du système, *sauf lorsque la substitution d'un élément a aussi pour effet de changer les interactions ou l'objectif*.

> **La composante la moins flagrante du système – sa fonction ou son objectif – détermine souvent son comportement de la manière la plus cruciale.**

Remplacer uniquement le plus haut dirigeant – un Brejnev par un Gorbatchev, ou un Carter par un Reagan – peut entraîner (ou non) toute une nation dans une nouvelle direction, même si son territoire, son industrie et ses centaines de millions de citoyens restent identiques. Un chef d'État peut faire en sorte que ce territoire, cette industrie et cette population jouent une partie différente avec de nouvelles règles, ou les orienter vers un nouvel objectif.

Inversement, étant donné que le territoire, les usines et les citoyens sont des éléments physiques du système qui évoluent lentement, il y a une limite à la vitesse à laquelle un chef d'État pourra donner un nouveau cap à une nation.

Baignoires niveau 1 : comprendre l'évolution du comportement d'un système

« Les informations contenues dans la nature […] nous permettent de reconstruire en partie le passé […]. Le développement des méandres d'un fleuve, la complexité croissante de la croûte terrestre […] recèlent des informations à l'instar des systèmes génétiques […]. L'accumulation d'informations implique l'accroissement de la complexité du mécanisme. »
Ramon Margalef[2]

Tout système repose sur un **stock**, à savoir les éléments que vous pouvez voir, sentir, compter ou mesurer à tout moment. Comme son nom l'indique, le stock d'un système désigne une réserve, une quantité, une accumulation de matière ou d'informations qui s'est formée au fil du temps. Il peut s'agir de l'eau d'une baignoire, d'une population, des ouvrages d'une librairie, du bois d'un arbre, de l'argent d'une banque ou de votre propre confiance en vous-même. Un stock n'est pas nécessairement physique. Votre réserve de bienveillance envers autrui ou votre provision d'espoir en un monde meilleur constituent aussi des stocks.

Un stock évolue avec le temps sous l'effet d'un **flux** – tels le remplissage et la vidange, les naissances et les décès, les achats et les ventes, la croissance et le pourrissement, les dépôts et les retraits, les succès et les échecs. Autrement dit, un stock est la mémoire des variations de flux au sein d'un système.

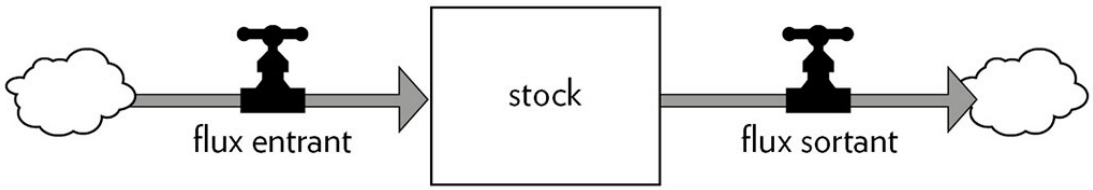


Figure 1. Comment lire un diagramme de stock et flux. Dans cet ouvrage, les stocks sont représentés par des « boîtes » rectangulaires, et les flux par des « tuyaux » qui se terminent par une flèche entrant ou sortant de la boîte. Le « robinet » placé sur chaque tuyau permet d'augmenter, de réduire, d'ouvrir ou d'interrompre le flux. Enfin, les « nuages » représentent l'origine et la destination du flux – la source et le puits, qui sont ignorés dans le présent propos.

> **Un stock est la mémoire des variations de flux au sein d'un système.**

Par exemple, un gisement souterrain constitue un stock dont l'extraction génère un flux de minerai. Sur une période inférieure à plusieurs milliers d'années, le flux entrant d'un tel gisement est infinitésimal. Par conséquent, j'ai choisi de représenter ce système sans aucun flux entrant (figure 2). *Tous* les diagrammes et descriptions de systèmes sont des versions simplifiées du monde réel.

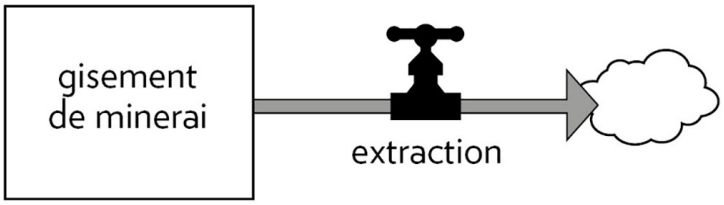


Figure 2. Stock de minerai entamé par l'extraction.

Le lac de retenue qui se forme derrière un barrage constitue un stock alimenté par les précipitations et par la rivière. De ce réservoir s'échappe de l'eau sous forme gazeuse en surface, et sous forme liquide à travers le barrage.

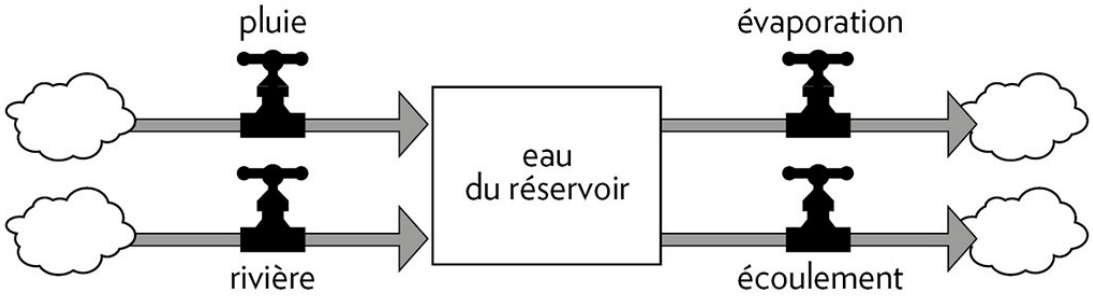


Figure 3. Stock d'eau d'un réservoir de barrage avec plusieurs flux entrants et sortants.

Dans une forêt, le volume de bois des arbres sur pied constitue également un stock. Le flux entrant réside dans la croissance des

arbres, et le flux sortant dans leur mort naturelle ou leur exploitation par les bûcherons. Les arbres abattus alimentent un nouveau stock, par exemple celui d'une scierie dont le flux sortant réside dans les pièces de bois d'œuvre fournies aux clients.

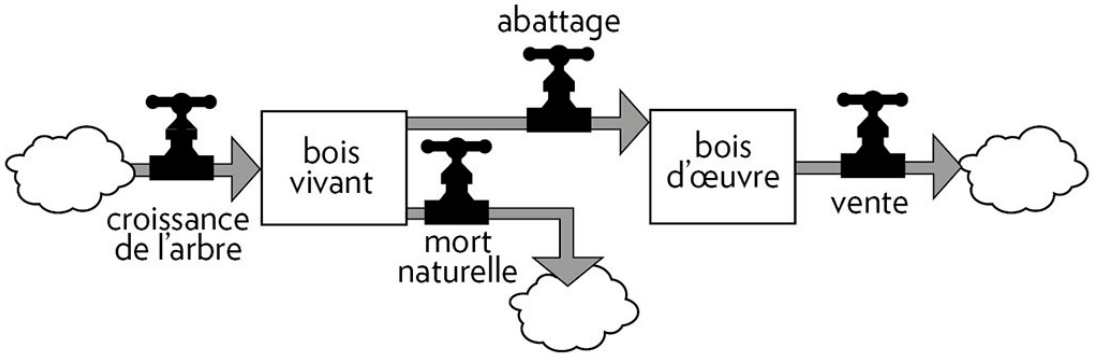


Figure 4. Le stock de bois d'œuvre d'une scierie découle du stock de bois vivant d'une forêt.

Une fois que vous aurez compris la **dynamique** des stocks et des flux – leur comportement au fil du temps –, vous maîtriserez le comportement des systèmes complexes. Et si vous avez déjà utilisé une baignoire, vous saisirez la dynamique des stocks et des flux.

Figure 5. Structure du système de la baignoire : un stock avec un flux entrant et un flux sortant.

Imaginez une baignoire pleine dont la bonde et les robinets sont fermés – un système inerte, inactif, ennuyeux au possible. En revanche, si vous levez la bonde, l'eau s'évacue et son niveau diminue jusqu'à ce que la baignoire soit vide.

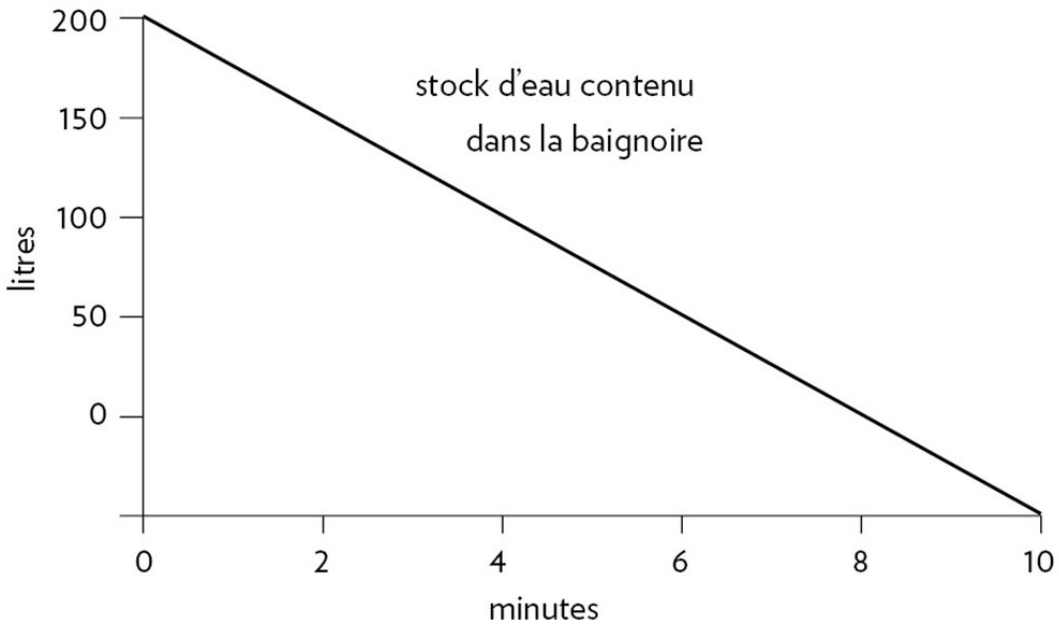


Figure 6. Diminution du volume d'eau contenu dans une baignoire lorsqu'on lève la bonde.

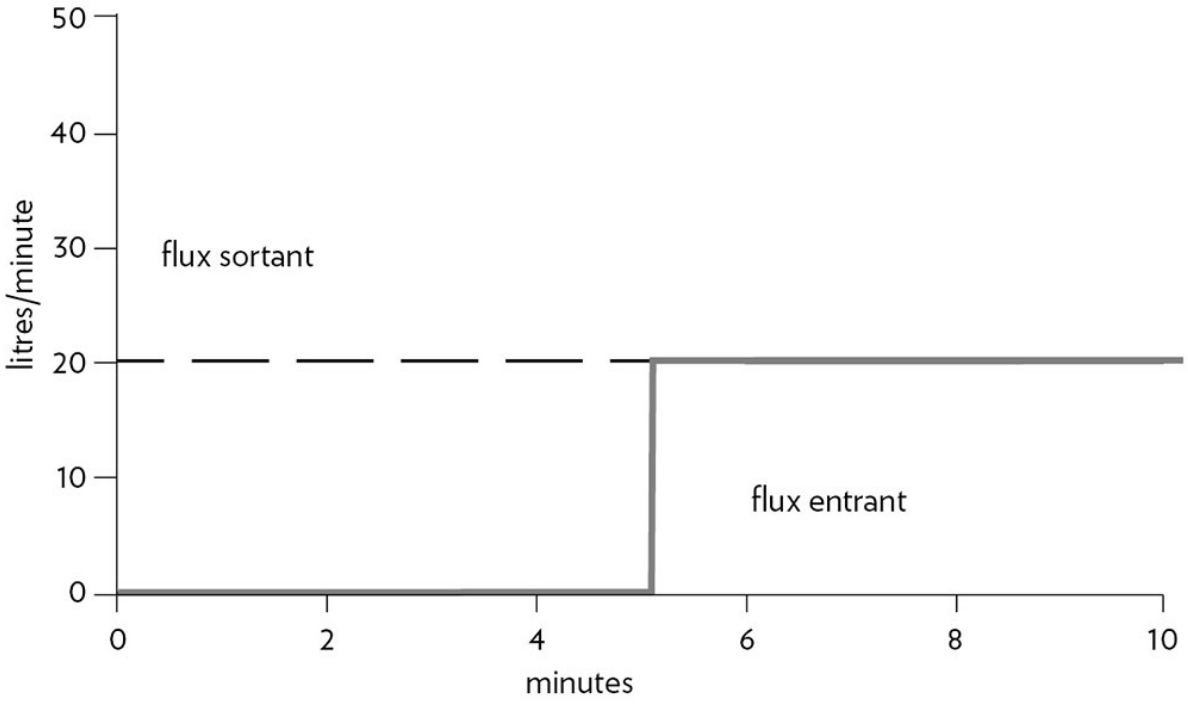
COMMENT LIRE UNE COURBE D'ÉVOLUTION D'UN COMPORTEMENT

Pour analyser l'évolution d'un système au fil du temps, les penseurs systémiques préfèrent recourir aux courbes d'évolution des comportements plutôt que de s'attacher aux évènements ponctuels. Ces courbes leur permettent en outre de savoir si le système est sur le point d'atteindre un objectif ou une limite, et dans ce cas à quelle échéance.

La variable étudiée peut être un stock ou un flux. La forme de la courbe a son importance, tout comme les points où celle-ci se modifie ou change de direction. Les chiffres précis qui figurent sur les axes revêtent souvent moins d'importance.

L'axe horizontal du temps permet de se demander ce qui s'est passé avant et ce qui pourrait se produire ensuite. Il vous aidera à vous concentrer sur l'horizon temporel le plus approprié à la question ou au problème que vous étudiez.

Imaginez maintenant que la baignoire est à nouveau pleine, que vous levez à nouveau la bonde, mais que, cette fois, lorsque la moitié de l'eau s'est évacuée, vous ouvrez le robinet d'alimentation de manière à ce que le flux entrant soit égal au flux sortant. Que se passe-t-il alors ? Le volume d'eau contenu dans la baignoire reste au niveau qu'il avait atteint lorsque les flux entrant et sortant sont devenus identiques. Il est parvenu à un état d'**équilibre dynamique** – le volume reste constant bien que l'eau coule continuellement.



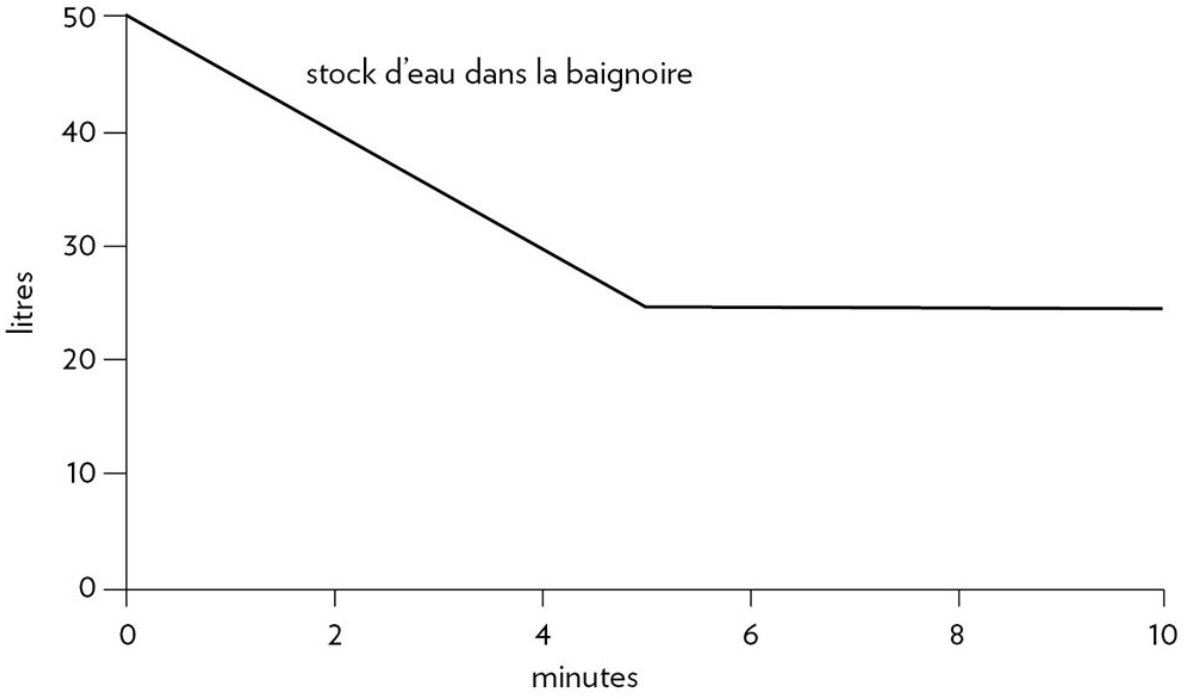


Figure 7. En haut : évacuation constante, robinet d'alimentation ouvert au bout de 5 minutes. En bas : évolution du stock d'eau dans la baignoire.

Imaginez que vous ouvrez un peu plus le robinet d'alimentation tandis que l'évacuation reste identique. Le niveau d'eau de la baignoire s'élèvera alors progressivement. Si vous réduisez à nouveau l'alimentation pour qu'elle revienne exactement au débit d'évacuation, le niveau de la baignoire cessera d'augmenter. Si vous fermez un peu plus le robinet, le niveau d'eau s'abaissera lentement.

Le modèle de la baignoire constitue un système très simple doté d'un seul stock, d'un flux entrant et d'un flux sortant. Au cours de la période observée (quelques minutes), j'ai supposé que l'évaporation était non significative et j'ai donc ignoré ce flux sortant. Tout modèle, qu'il soit mental ou mathématique, constitue une simplification du monde réel. Une fois que vous connaissez toutes les possibilités dynamiques de cette baignoire, vous pouvez en déduire certains principes importants qui s'appliquent à des systèmes plus complexes :

• Tant que la somme de tous les flux entrants excède la somme de tous les flux sortants, le niveau du stock augmente ;

• Tant que la somme de tous les flux sortants excède la somme de tous les flux entrants, le niveau du stock diminue ;

• Si la somme de tous les flux sortants est égale à la somme de tous les flux entrants, le niveau du stock reste constant ; il est maintenu dans un équilibre dynamique au niveau auquel il se trouvait lorsque les deux types de flux sont devenus équivalents.

L'esprit humain semble avoir plus de facilité à appréhender les stocks que les flux. De plus, quand nous nous intéressons aux flux, nous avons davantage tendance à envisager les *flux entrants* que les flux sortants. Si bien que nous oublions parfois que nous pouvons remplir une baignoire non seulement en augmentant le débit d'alimentation, mais aussi en réduisant le débit d'évacuation. Chacun a conscience que l'on peut prolonger la vie d'une économie basée sur le pétrole en découvrant de nouveaux gisements. Mais nous avons plus de mal à comprendre que nous parviendrions au même résultat en brûlant moins de pétrole. Ainsi, une invention permettant d'accroître l'efficacité énergétique aura un effet comparable sur le stock de pétrole disponible à la découverte d'un nouveau gisement – même si les personnes qui en profiteront ne sont pas les mêmes.

> **On peut accroître un stock aussi bien en réduisant les flux sortants qu'en augmentant les flux entrants.**
> Il existe plusieurs manières de remplir une baignoire !

De manière similaire, une entreprise peut accroître son personnel soit en embauchant davantage de salariés, soit en réduisant les départs et les licenciements. Mais ces deux stratégies impliqueront sans doute des coûts très différents. On peut augmenter la richesse d'une nation par le biais d'investissements afin d'accroître le stock d'usines et de machines. Mais on peut aussi le faire, souvent à moindre coût, en réduisant la vitesse à laquelle les usines et les machines s'usent, tombent en panne ou sont remplacées.

Vous pouvez modifier le débit de la bonde ou du robinet d'une baignoire – les flux – de façon soudaine, mais vous aurez plus de mal

à modifier rapidement le niveau de l'eau – le stock. L'eau ne s'évacuera pas instantanément, même si vous relevez totalement le clapet de la bonde. Inversement, la baignoire ne se remplira pas en un clin d'œil, même si vous ouvrez le robinet à fond. *Un stock met du temps à changer, car les flux mettent du temps à s'écouler.* C'est un point essentiel pour comprendre le comportement des systèmes. Les stocks évoluent en général lentement. Ils font office de retardateurs, de temporisateurs, de tampons, de lests et de sources d'inertie au sein d'un système. Les stocks, notamment ceux de grande ampleur, ne répondent aux changements, même soudains, qu'en augmentant ou en diminuant de manière progressive.

> **Un stock évolue en général lentement, même quand les flux entrants ou sortants changent soudainement.**
> Ainsi, les stocks font office de temporisateurs, de tampons ou d'absorbeurs de choc dans un système.

Souvent, les gens sous-estiment l'inertie intrinsèque d'un stock. Il faut beaucoup de temps pour qu'une population augmente ou cesse de le faire, que le bois se forme dans une forêt, qu'un réservoir se remplisse ou qu'une mine s'épuise. Une économie nationale ne peut constituer un large stock d'usines, d'autoroutes et de centrales électriques du jour au lendemain, quand bien même elle disposerait d'une fortune colossale. Lorsqu'un système économique comporte un grand nombre de chaudières à mazout et de véhicules à hydrocarbures, il ne peut changer rapidement de combustible au gré des fluctuations soudaines du prix du pétrole. Il a fallu des décennies pour que les polluants destructeurs de la couche d'ozone s'accumulent dans la stratosphère ; il faudra plusieurs décennies pour s'en débarrasser.

La dynamique des systèmes repose sur l'évolution des stocks. L'industrialisation ne saurait s'accroître plus vite que les usines et les machines peuvent être construites et que les êtres humains peuvent être formés pour les faire tourner. Une forêt ne pousse pas en 24 heures. Une fois que des contaminants se sont accumulés dans les

eaux souterraines, ils ne s'éliminent qu'au rythme du renouvellement des nappes phréatiques, ce qui peut demander des décennies, voire des siècles.

Le décalage temporel qui résulte de la lenteur d'évolution des stocks peut être source de problèmes pour les systèmes, mais aussi de stabilité. Les sols qui se sont formés durant plusieurs siècles s'érodent rarement d'un seul coup. Les populations qui ont accumulé de nombreux savoir-faire ne les oublient pas instantanément. On peut prélever longtemps les eaux souterraines à un rythme supérieur au renouvellement de la nappe avant que celle-ci ne soit irrémédiablement épuisée. Ainsi le décalage imposé par les stocks laisse-t-il une marge de manœuvre pour expérimenter et corriger les politiques inappropriées.

Lorsque vous avez conscience du rythme d'évolution des stocks, vous ne vous attendez pas à ce que les choses aillent plus vite qu'il n'est possible. Vous n'abandonnez pas prématurément. Vous pouvez tirer parti de l'inertie du système pour l'orienter vers un résultat favorable – tout comme le judoka utilise la force de son adversaire pour parvenir à ses fins.

Concernant le rôle des stocks au sein des systèmes, il existe un autre principe important qui nous mènera directement à la notion de rétroaction ou feedback. La présence du stock permet aux flux entrant et sortant d'être indépendants et de se retrouver temporairement en déséquilibre l'un par rapport à l'autre.

> **Le stock permet le découplage des flux entrant et sortant,** qui peuvent provisoirement se retrouver en déséquilibre l'un par rapport à l'autre.

La gestion d'une compagnie pétrolière serait ardue si l'essence devait être raffinée au rythme où les voitures la consomment. Une forêt ne saurait être exploitée au rythme précis de la croissance des arbres. Aussi le stockage de l'essence et du bois permet-il à la vie de se dérouler avec une certaine certitude, continuité et prévisibilité même si les flux varient à court terme.

Les êtres humains ont inventé des centaines de mécanismes de stockage afin d'assurer l'indépendance et la stabilité des flux entrants et sortants. Les réservoirs d'eau permettent aux habitants et aux agriculteurs en aval de ne pas adapter constamment leur vie et leur activité en fonction des fluctuations de la rivière, notamment lors de son assèchement et de sa crue. Les banques vous permettent de laisser varier temporairement vos revenus par rapport à vos dépenses. La gestion des stocks entre les distributeurs, les grossistes et les détaillants permet à la production d'être continue même si la demande des clients fluctue, et à cette dernière d'être satisfaite même si le rythme de production varie.

La plupart des décisions prises par les individus et les institutions visent à réguler les niveaux des stocks. Lorsque les stocks de biens de consommation deviennent trop importants, on réduit les prix ou on augmente les budgets publicitaires afin que les ventes remontent et que les réserves baissent. Lorsque les placards de votre cuisine se vident, vous allez faire les courses. Selon la quantité de céréales qui poussent dans leurs champs, les agriculteurs décident ou non d'arroser ou de traiter leurs plantations, les entreprises céréalières décident du nombre de barges à réserver, les spéculateurs parient sur la future valeur des récoltes, et les éleveurs de bétail étoffent ou réduisent leurs troupeaux. Le niveau des réservoirs d'eau suscite toutes sortes d'actions correctives, selon qu'il est trop haut ou trop bas. Des phénomènes similaires ont lieu concernant l'argent contenu dans votre portefeuille, les réserves détenues par une compagnie pétrolière, le stock de plaquettes de bois alimentant une usine à papier, ou la concentration de polluants dans un lac.

Les gens surveillent en permanence les stocks, prennent des décisions et entreprennent des actions visant à augmenter ces réserves, à les réduire ou à les maintenir dans des fourchettes acceptables. Ces choix influent à leur tour sur les variations, les succès et les problématiques de toutes sortes de systèmes. Les penseurs systémiques voient le monde comme un ensemble de stocks associés à des mécanismes qui permettent de réguler leurs niveaux en manipulant les flux.

En d'autres termes, les théoriciens des systèmes envisagent le monde comme un ensemble de « processus de rétroaction ».

Comment le système s'autorégule : la rétroaction

> « Les systèmes de rétrocontrôle sont essentiels à toute vie et toute entreprise humaine, depuis la lente évolution biologique jusqu'au lancement du dernier satellite. […] Tout ce que nous faisons, peu importe que nous soyons un individu, une industrie ou une entreprise, nous le faisons dans le cadre d'un système de retour d'information. »
> *Jay W. Forrester*[3]

Lorsqu'un stock augmente de manière spectaculaire, qu'il diminue rapidement ou qu'il reste dans une certaine fourchette peu importe le contexte, un mécanisme de régulation est sans doute à l'œuvre. Autrement dit, si vous observez un comportement qui persiste au fil du temps, il y a vraisemblablement un mécanisme sous-jacent qui opère par le biais d'une **boucle de rétroaction**. En effet, la constance d'un comportement sur une longue période constitue le premier indice de l'existence d'une boucle de rétroaction.

Une boucle de rétroaction se forme dès lors que la modification d'un stock affecte le flux entrant ou sortant de ce même stock. Cette rétroaction peut être tout à fait simple et directe. Prenons l'exemple d'un compte d'épargne rémunéré. La somme d'argent qui s'y trouve (le stock) conditionne le montant des intérêts qu'il recevra. En effet, selon la règle établie par la banque, le compte perçoit chaque année un certain pourcentage de l'argent accumulé. Le montant total des intérêts versés chaque année (le flux entrant) n'est pas fixe, mais il varie en fonction de la somme qui se trouve sur le compte.

Vous faites également l'expérience d'une boucle de rétroaction relativement directe lorsque vous recevez votre relevé de compte à la fin de chaque mois. Si les liquidités se trouvant sur votre compte courant (le stock) diminuent, vous déciderez éventuellement de travailler plus pour gagner davantage. L'argent qui arrive sur votre compte constitue un flux que vous pouvez ajuster de manière à ce que votre stock de liquidités atteigne un niveau plus confortable. Et lorsque votre solde devient très important, vous avez la possibilité de travailler moins (pour réduire le flux entrant). Ce type de boucle de rétroaction maintient vos liquidités dans une fourchette acceptable à vos yeux. Bien entendu, l'adaptation de vos revenus n'est pas la seule boucle de rétroaction qui influe sur votre stock d'argent. Vous pouvez également faire varier par exemple le flux sortant de votre compte bancaire en jouant sur vos dépenses.

Une boucle de rétroaction a pour effet de maintenir le niveau d'un stock dans une certaine fourchette, ou bien de l'augmenter ou de le réduire. Dans tous les cas, les flux entrants ou sortants sont ajustés à la suite de changements survenus dans la taille du stock lui-même. La personne ou le mécanisme qui contrôle le niveau du stock amorce un processus correctif afin d'ajuster le flux entrant ou sortant (ou les deux) et de modifier le niveau du stock. Ainsi, ce dernier s'autorégule par le biais d'un enchaînement de signaux et d'actions.

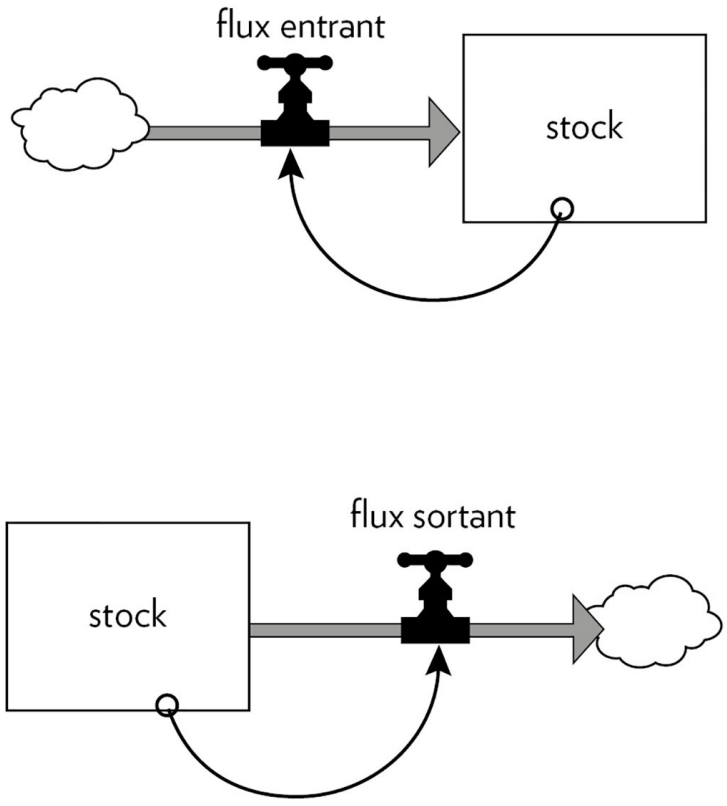


Figure 8. Comment lire un diagramme de stock et flux avec boucle de rétro- action ? Chaque schéma distingue le stock, le flux qui modifie le stock, et le retour d'information (représenté par une mince flèche incurvée) qui suscite l'action. Ce type de schéma montre que l'action ou le changement passe toujours par un ajustement du flux.

Tous les systèmes n'impliquent pas des boucles de rétroaction. Certains constituent des chaînes ouvertes relativement simples de stock et de flux. Une telle chaîne peut être affectée par des facteurs externes, mais les niveaux de ses stocks n'affectent pas ses flux. Néanmoins, les systèmes comportant des boucles de rétroaction sont courants et s'avèrent parfois assez subtils ou surprenants, comme nous allons le voir.

> Une boucle de rétroaction est une chaîne fermée de liens de causalité à partir d'un stock qui, par un ensemble de décisions ou règles ou lois physiques ou actions dépendant du niveau du stock, modifient ce dernier par le biais d'un flux.

Les boucles régulatrices : stabiliser la rétroaction

Un type répandu de boucle de rétroaction a pour effet de stabiliser le niveau du stock, comme dans l'exemple du compte bancaire. Le niveau du stock n'est pas totalement fixe, mais il fluctue dans des limites acceptables. Voici d'autres exemples de boucles stabilisatrices qui vous sont probablement familières, pour lesquelles nous détaillerons davantage les étapes intermédiaires.

Si vous êtes un buveur de café, quand vous manquez d'énergie, vous prenez sans doute une tasse de ce sombre nectar pour vous requinquer. En tant que consommateur de café, vous avez à l'esprit un niveau de stock souhaité (l'énergie nécessaire pour travailler). L'objectif de ce système d'apport en caféine est de maintenir votre stock réel au niveau ou à proximité du niveau que vous désirez. (Il se peut que vous ayez également d'autres raisons de boire du café : savourer son arôme, ou partager un moment convivial.) C'est le décalage, l'écart entre vos niveaux d'énergie réel et souhaité pour travailler qui entraîne votre décision d'ajuster votre apport journalier en caféine.

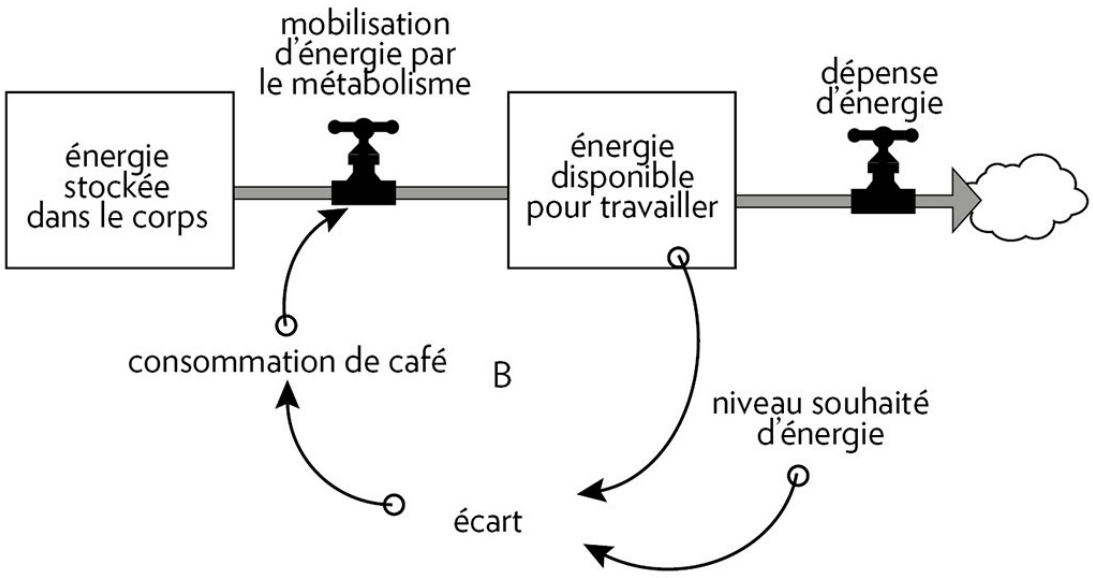


Figure 9. Niveau d'énergie d'un buveur de café.

Vous remarquerez que les éléments de la figure 9, comme ceux de tous les schémas de stock et flux dans cet ouvrage, sont non orientés. Le premier s'intitule « énergie stockée dans le corps », et non « *faible niveau* d'énergie ». De même, l'élément « consommation de café » ne dit pas « *apport* de café ». En effet, les boucles de rétroaction fonctionnent souvent dans les deux sens, et corrigent aussi bien un excédent qu'une carence. Si, après avoir bu trop de café, vous devenez une véritable pile électrique, vous cesserez d'en consommer pour un temps. Un excès d'énergie crée un trop-plein qui vous incite à réduire votre consommation jusqu'à ce que votre niveau d'énergie diminue. Ce schéma montre que la boucle permet de réguler le stock d'énergie dans un sens comme dans l'autre.

J'aurais pu représenter le flux entrant d'énergie sous la forme d'un nuage, mais j'ai rendu ce schéma un peu plus complexe. *Rappelez-vous que tous les diagrammes systémiques sont des simplifications du monde réel.* Chacun de nous choisit le degré de complexité qu'il souhaite envisager.Ici, j'ai indiqué un autre stock – l'énergie emmagasinée dans le corps, qui peut être mobilisée par le biais de la caféine. Je l'ai fait pour montrer que le système ne se résume pas à une simple boucle de rétroaction. Comme le savent les

adeptes du petit noir, la caféine est un stimulant à court terme. Cette substance vous permet de lancer le moteur plus rapidement, mais elle ne recharge pas votre réservoir personnel. Son effet finit par s'atténuer, si bien que votre corps manque davantage d'énergie qu'auparavant. Cette baisse d'énergie peut réactiver la boucle et susciter une nouvelle ruée vers la cafetière. (Voir la discussion sur l'addiction plus loin dans cet ouvrage.) Ou bien elle peut entraîner des réactions plus saines et plus pérennes : manger, marcher, dormir.

Ce type de boucle stabilisatrice tendant vers un objectif est qualifié de **boucle de rétroaction régulatrice** (*balancing feedback loop*), d'où le B que j'ai inscrit en son centre sur le schéma. Ces boucles régulatrices tendent vers un *objectif* ou vers la *stabilité*. Chacune s'efforce de maintenir un stock à un niveau donné ou dans une certaine fourchette. Une boucle régulatrice s'oppose à tout changement imposé au système. Si vous augmentez un stock à l'excès, la boucle cherchera à le ramener à son niveau initial. Si vous réduisez un stock dans des proportions trop importantes, la boucle fera en sorte de le reconstituer.

Voici un autre exemple de boucle régulatrice liée au café, qui repose non sur les décisions humaines mais sur les lois physiques. Une tasse de café brûlant refroidit progressivement jusqu'à atteindre la température ambiante. La vitesse du refroidissement dépend de l'écart de température entre le breuvage et la pièce. Plus cet écart est important, plus le café tiédit rapidement. La boucle fonctionne également dans le sens inverse – si vous préparez un café glacé en plein été, il se réchauffera jusqu'à parvenir à la température ambiante. Ce système a pour fonction de ramener à zéro l'écart entre la température du café et celle de la pièce, que la différence soit dans un sens ou dans l'autre.

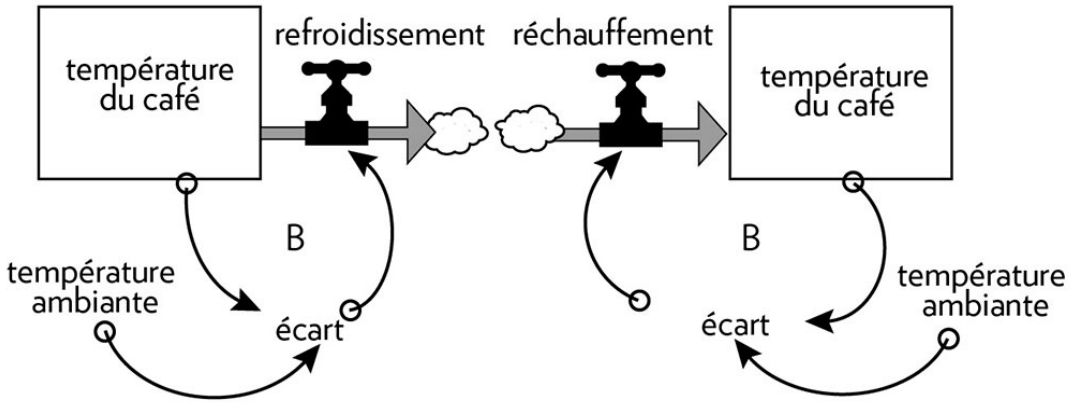


Figure 10. Refroidissement (à gauche) ou réchauffement (à droite) d'une tasse de café.

Les courbes de la figure 11 montrent l'évolution de la température du café (si vous ne le buvez pas) selon qu'il est bouillant, chaud, froid ou glacé au départ. On observe la tendance d'une boucle régulatrice à revenir à son point d'équilibre. Peu importe la valeur initiale du stock (dans ce cas, la température du café), qu'elle se trouve au-dessus ou au-dessous de l'« objectif » (la température de la pièce), la boucle de rétroaction la ramène vers ce dernier. Le changement est rapide dans un premier temps, puis il ralentit à mesure que l'écart entre le stock et l'objectif diminue.

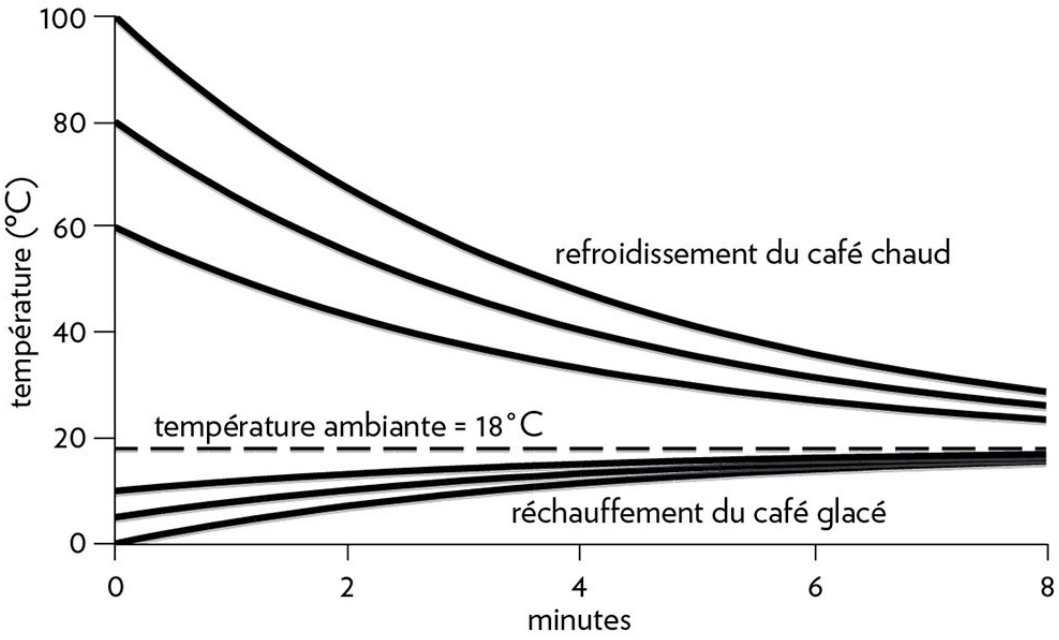


Figure 11. La température du café rejoint progressivement celle de la pièce.

> **Tendant vers un objectif ou recherchant l'équilibre, une boucle de rétroaction régulatrice est à la fois source de stabilité et de résistance au changement dans les systèmes.**

On observe également ce mode de comportement – l'approche progressive d'un objectif défini par le système – lorsqu'un élément radioactif se désintègre, lorsqu'un missile se dirige vers sa cible, lorsqu'un actif se déprécie, lorsqu'on vidange ou remplit un réservoir de barrage jusqu'au niveau souhaité, lorsque votre corps ajuste la concentration en glucose dans le sang ou lorsque vous freinez en voiture à l'approche d'un feu rouge. Vous trouverez de nombreux autres exemples. Le monde qui nous entoure regorge de boucles de rétroaction tendant vers un objectif.

Toutefois, la présence d'une boucle de rétroaction n'implique pas nécessairement que le système fonctionne *bien*. Il se peut que le mécanisme de rétroaction ne soit pas assez robuste pour amener le stock au niveau désiré. Que le retour d'information – les interactions, les données du système – échoue pour diverses raisons. Que les informations arrivent trop tard ou au mauvais endroit. Qu'elles

soient ambiguës, incomplètes ou difficiles à interpréter. Que l'action déclenchée par ces informations soit insuffisante, trop tardive, restreinte faute de ressources, ou tout bonnement inefficace. Ou encore que le stock n'atteigne jamais l'objectif de la boucle de rétroaction. Néanmoins, dans le cas simple de la tasse de café, le breuvage finira certainement par atteindre la température ambiante.

Les boucles amplificatrices : renforcer la rétroaction

> « Il me faudrait le repos pour me rafraîchir le crâne, et pour avoir du repos, il faut voyager, et, pour voyager il faut de l'argent, et, pour avoir de l'argent il faut travailler, créer, etc. : je suis dans un cercle vicieux d'où il m'est impossible de sortir. »
> *Honoré de Balzac*[4]

> « Nous sommes confrontés ici à un phénomène très important. Il semblerait s'agir d'un raisonnement circulaire ; les profits baissent parce que les investissements diminuent, et les investissements diminuent parce que les profits baissent. »
> *Jan Tinbergen, économiste*[5]

Le second type de boucle de rétroaction est amplificateur, autorenforcé ou encore à effet boule de neige – un cercle vertueux ou vicieux qui peut entraîner une croissance saine ou une destruction galopante. Il est qualifié de **boucle de rétroaction amplificatrice** (*reinforcing feedback loop*), que je signalerai par R sur les diagrammes. Plus le stock est important, plus il est alimenté (et moins il est important, moins il est alimenté). Une boucle amplificatrice renforce le changement qui lui est appliqué.

En voici quelques exemples :

• Quand j'étais petite, plus mon frère m'enquiquinait, plus je l'enquiquinais à mon tour, et plus il ripostait.

• Plus les prix augmentent, plus les salaires doivent augmenter pour que les gens conservent leur niveau de vie. Et plus les salaires augmentent, plus les prix doivent augmenter pour maintenir les profits. Si bien que les salaires doivent à nouveau augmenter, et les prix à leur tour.

• Plus il y a de lapins, plus il y a de parents qui font des petits. Lesquels deviennent des adultes qui engendrent encore davantage de lapereaux.

• Plus les terres sont érodées, moins les plantes parviennent à se développer, si bien qu'il y a de moins en moins de racines pour retenir le sol, que le sol s'érode davantage et que les plantes sont de moins en moins nombreuses à pousser.

• Plus je pratique le piano, plus le son que j'obtiens me procure de plaisir. Par conséquent, je joue davantage, ce qui me fait acquérir d'autant plus de pratique.

On trouve une boucle amplificatrice à chaque fois qu'un élément d'un système a la capacité de se reproduire ou de croître d'une fraction constante de lui-même. Cet élément peut prendre la forme d'une population ou d'une économie. Rappelez-vous le compte d'épargne rémunéré. Plus vous avez d'argent en banque, plus vous percevez d'intérêts, lesquels s'ajoutent à votre solde et génèrent davantage d'intérêts.

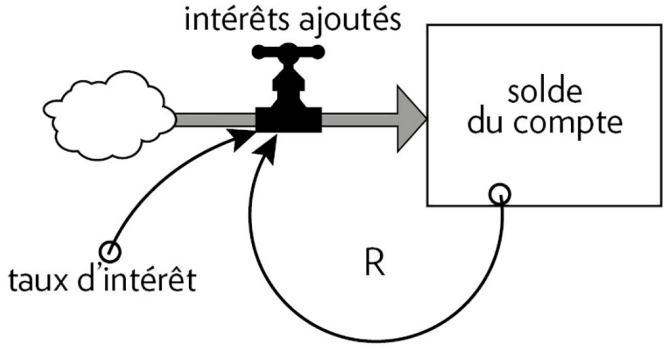


Figure 12. Compte d'épargne rémunéré.

La figure 13 montre comment cette boucle amplificatrice multiplie la valeur d'un livret d'épargne avec un dépôt initial de 100 dollars, en supposant qu'aucun mouvement ne soit réalisé pendant 12 ans. Les cinq courbes correspondent à différents taux d'intérêt s'échelonnant de 2 à 10 % par an.

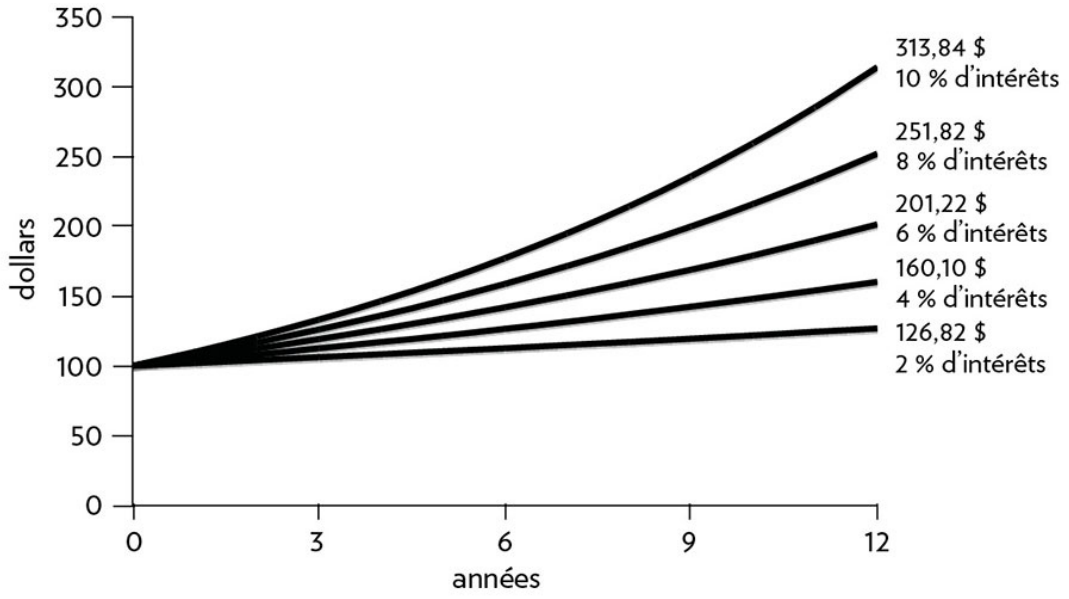


Figure 13. Croissance d'un pécule en fonction de divers taux d'intérêt.

Il ne s'agit pas d'une croissance linéaire qui serait constante au fil du temps. Lorsque les taux d'intérêt sont faibles, la croissance de l'épargne peut sembler linéaire au cours des premières années. Mais en réalité, elle est de plus en plus rapide. Plus il y a d'argent sur le compte, plus la rémunération augmente. Ce type de croissance est qualifiée d'« exponentielle ».

Ce qui peut être bon ou mauvais selon ce qui augmente – le solde d'un compte bancaire, les malades du sida, les nuisibles dans un champ de maïs, l'économie d'un pays ou les missiles dans une course aux armements.

> **Une boucle de rétroaction amplificatrice s'autorenforce, entraînant une croissance exponentielle ou un effondrement majeur avec le temps.** Elle survient lorsqu'un stock a la capacité de grossir ou de se reproduire.

À la figure 14, plus vous avez de machines et d'usines (qualifiées collectivement de « capital »), plus vous pouvez fournir de biens et services (« production »). Et plus votre production augmente, plus vous pouvez investir dans de nouvelles machines et de nouvelles usines. Ainsi, plus vous produisez, plus vous avez la capacité de produire davantage. Cette boucle de rétroaction amplificatrice constitue le principal moteur de croissance d'une économie.

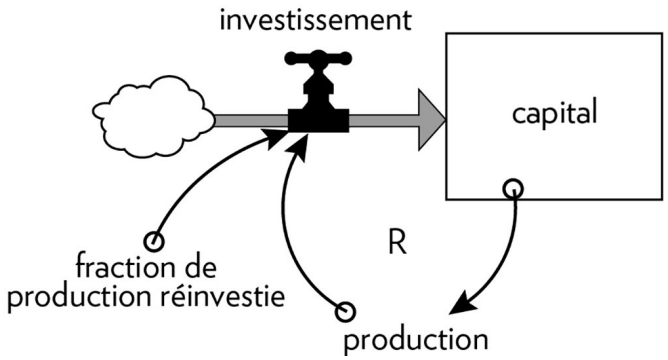


Figure 14. Réinvestissement dans le capital.

Vous voyez désormais combien les boucles de rétroaction régulatrices et amplificatrices sont essentielles aux systèmes. Parfois, je défie mes étudiants de trouver une décision humaine que l'on prendrait *sans* faire appel à la moindre boucle de rétroaction – autrement dit, un choix que l'on ferait sans tenir compte de la moindre information relative au niveau du stock sur lequel il influerait. Réfléchissez-y vous-même. Plus vous vous y efforcerez, plus vous verrez des boucles de rétroaction partout.

Les choix « sans rétroaction » que mes étudiants suggèrent le plus souvent sont le fait de tomber amoureux ou de se suicider. Je vous

laisserai apprécier si de telles décisions se prennent *véritablement* sans que la moindre rétroaction entre en ligne de compte.

Attention ! Si vous commencez à voir des boucles de rétroaction partout, vous risquez fort de devenir un penseur systémique ! Au lieu de vous contenter de voir qu'A entraîne B, vous vous demanderez comment B

BOUCLES AMPLIFICATRICES ET TEMPS DE DOUBLEMENT

Sachant que nous rencontrons si souvent des boucles amplificatrices, l'astuce suivante peut s'avérer très utile. Le délai nécessaire pour qu'un stock à croissance exponentielle double de volume, ou « temps de doublement », équivaut à peu près à 70 divisé par le taux de croissance (exprimé en pourcentage). Par exemple, si vous déposez 100 dollars sur un compte rémunéré à 7 % par an, vous doublerez votre mise en 10 ans (70 ÷ 7 = 10). Si votre taux d'intérêt est seulement de 5 %, vous devrez attendre 14 ans.

pourrait *aussi* influer sur A – et comment A pourrait se renforcer ou s'inverser. Quand vous entendrez le soir aux informations que la Banque centrale a fait quelque chose pour réguler l'économie, vous comprendrez également que l'économie a dû faire quelque chose pour affecter la Banque centrale. Lorsqu'on vous dira que la croissance démographique fait augmenter la pauvreté, vous vous demanderez comment la pauvreté pourrait entraîner la croissance de la population.

RÉFLÉCHISSEZ-Y

Si A entraîne B, se peut-il que B entraîne également A ?

Vous penserez alors non plus en termes de monde statique, mais de monde dynamique. Au lieu de chercher le coupable, vous vous demanderez : « Quel est le système ? » Le concept de rétroaction amène l'idée selon laquelle un système peut influer sur son propre comportement.

Jusqu'ici, j'ai limité mon exposé à un seul type de rétroaction pour chaque système. Bien entendu, dans la réalité, les boucles de rétroaction sont rarement seules. Plusieurs boucles interagissent en général, souvent de manière extraordinairement complexe. Un stock unique sera vraisemblablement soumis à plusieurs boucles régulatrices et amplificatrices de différentes puissances qui le feront fluctuer en diverses directions. Un flux unique pourra varier en fonction du contenu de trois, cinq ou vingt stocks. Il pourra alimenter un stock tout en vidant un autre stock et en pesant sur des décisions qui modifieront un troisième stock. Les nombreuses boucles de rétroaction d'un système jouent les unes contre les autres, s'efforçant d'accroître des stocks, de les épuiser ou de les équilibrer. Par conséquent, les systèmes complexes font bien plus que de rester stables ou de croître exponentiellement ou de tendre graduellement vers un objectif – comme nous allons le voir.

---

* Les termes en gras sont définis dans le glossaire en fin d'ouvrage.

2.
Courte visite au zoo des systèmes

> « L'objectif [de] toute théorie est de faire en sorte que ces éléments fondamentaux […] soient aussi simples et aussi peu nombreux que possible, sans devoir pour autant renoncer à la représentation adéquate de [l'expérience]. »
> *Albert Einstein, physicien*[1]

Pour apprendre quelque chose de nouveau, mieux vaut se pencher sur des exemples spécifiques que sur des abstractions et des généralités. Voici donc quelques exemples de systèmes courants et simples, quoique importants, qui sont utiles à comprendre en eux-mêmes et qui illustrent de nombreux principes généraux relatifs aux systèmes complexes.

Cette collection revêt en partie les avantages et les inconvénients d'un zoo[2]. Elle donne une idée de la grande variété de systèmes qui existent dans le monde, mais elle est loin d'en offrir une représentation exhaustive. Elle regroupe les animaux par familles – les singes d'un côté, les ours de l'autre (les systèmes à un stock d'un côté, les systèmes à deux stocks de l'autre) – afin que vous puissiez observer les comportements spécifiques aux singes par rapport à ceux des ours. Mais comme dans un zoo, cette classification est trop ordonnée. Pour vous permettre de voir et de comprendre les animaux, le zoo les sépare les uns des autres et de leur environnement habituel. Tout comme les animaux se mélangent dans leurs écosystèmes naturels, les systèmes décrits dans ce chapitre interagissent généralement les uns avec les autres ainsi

qu'avec d'autres systèmes non mentionnés ici – formant la complexité bourdonnante, mugissante, gazouillante et changeante au sein de laquelle nous vivons.

Nous aborderons les écosystèmes un peu plus loin. Tout d'abord, observons les animaux systémiques de manière isolée.

Systèmes à stock unique

Un stock et deux boucles régulatrices concurrentes – un thermostat

Vous connaissez déjà le comportement de la boucle de rétroaction dont l'objectif est de revenir à son point d'équilibre – le refroidissement de la tasse de café. Que se passe-t-il lorsque deux boucles de ce type s'efforcent de tirer un même stock vers des objectifs différents ?

Le thermostat qui régule le chauffage ou la climatisation de votre chambre en est un exemple. Comme tout modèle, sa représentation à la figure 15 est une simplification d'un véritable système de chauffage domestique.

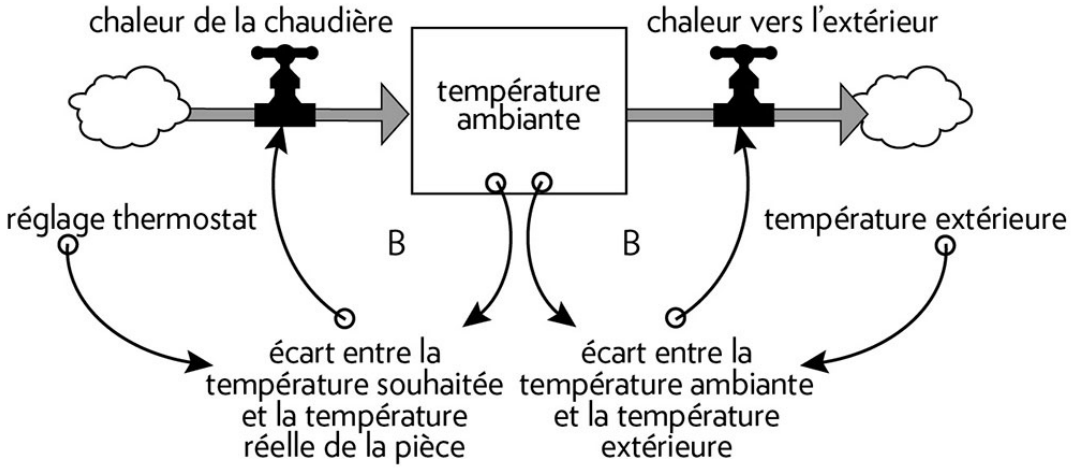


Figure 15. Température d'une pièce régulée par une chaudière et son thermostat.

Quand la température ambiante descend en dessous de celle qui est programmée, le thermostat détecte l'écart et envoie un signal à la

chaudière pour qu'elle fasse circuler l'eau chaude de manière à réchauffer la pièce. Une fois la température revenue au niveau désiré, le thermostat fait cesser la circulation. Cette boucle de rétroaction régulatrice simple visant le maintien d'un stock est représentée du côté gauche de la figure 15. Si le système se limitait à cette régulation et que votre chambre était froide à un instant donné avec un thermostat réglé sur 18 °C, il se comporterait comme indiqué à la figure 16. La chaudière se met en marche, et la pièce se réchauffe. Quand la température ambiante atteint celle qui est spécifiée, la chaudière s'éteint et la pièce reste à la température voulue.

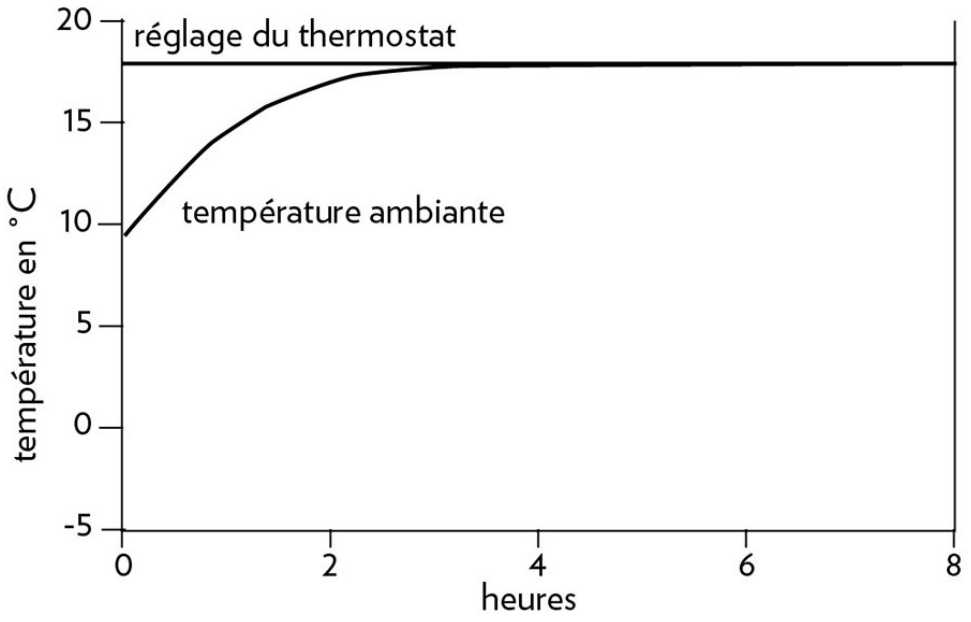


Figure 16. La température d'une pièce froide augmente rapidement jusqu'au niveau programmé.

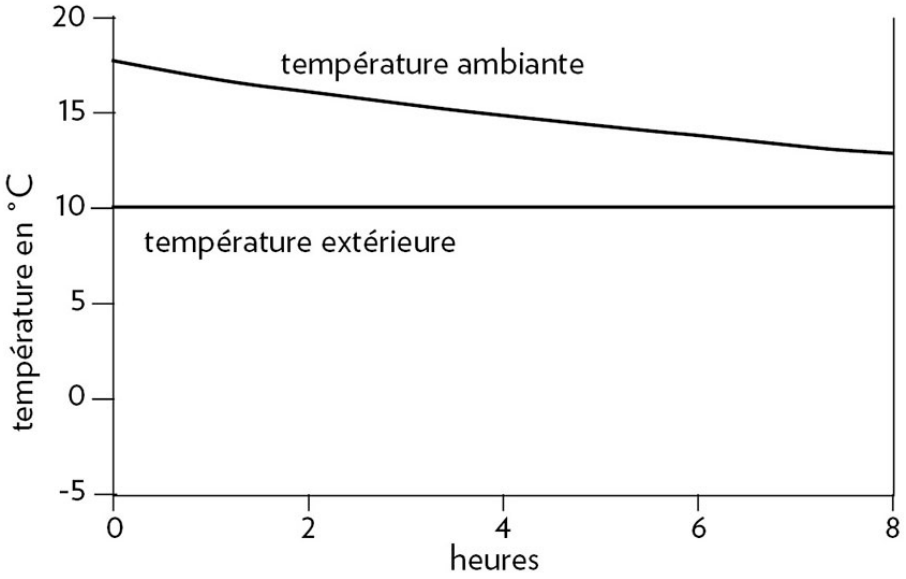


Figure 17. Une pièce chaude se refroidit très lentement jusqu'à la température extérieure de 10 °C.

Cependant, ce n'est pas la seule boucle de rétroaction qui entre en jeu dans ce système. La chaleur s'échappe également vers l'extérieur selon la deuxième boucle régulatrice (représentée du côté droit de la figure 15), laquelle fait en sorte que la température de la pièce rejoigne celle de l'extérieur, à l'instar de la tasse de café qui refroidit. Si cette seconde boucle était la seule du système (s'il n'y avait pas de chaudière), la figure 17 illustrerait ce qu'il adviendrait dans une pièce chaude par temps froid.

On suppose que l'isolation de la chambre est imparfaite, si bien qu'une partie de la chaleur s'évacue dans le milieu extérieur qui est plus froid. Plus l'isolation est efficace, plus la température baisse lentement.

Que se passe-t-il lorsque ces deux boucles interviennent simultanément ? En supposant que l'isolation soit suffisante et que la chaudière soit correctement dimensionnée, la boucle de réchauffement domine la boucle de refroidissement. Si bien que la chambre finit par se réchauffer même si elle est initialement froide et que le temps est frisquet (voir figure 18).

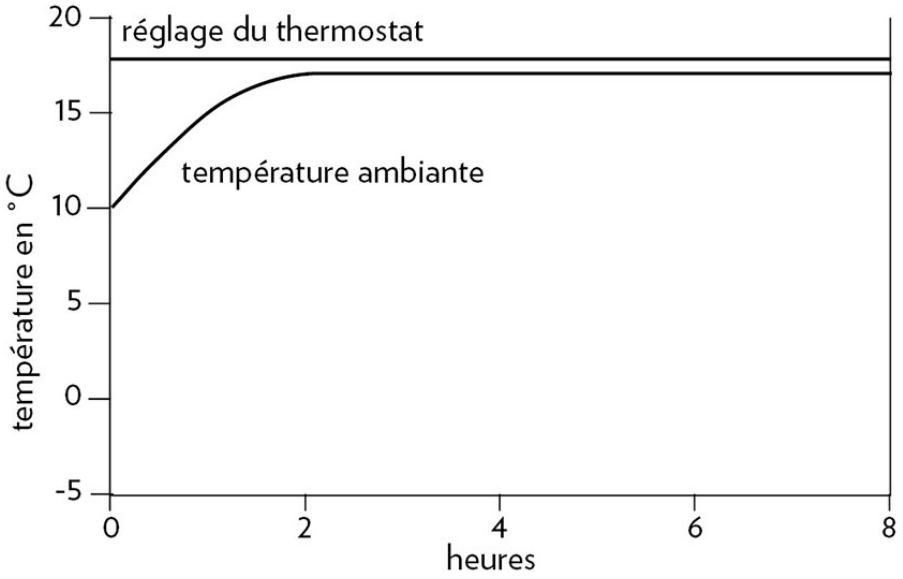


Figure 18. La chaudière parvient à réchauffer une pièce froide bien qu'une partie de la chaleur s'échappe à l'extérieur.

Plus la pièce se réchauffe, plus il y a de chaleur qui s'évacue dehors du fait que l'écart entre les températures intérieure et extérieure augmente. Cependant, la chaudière apporte davantage de chaleur que la quantité qui s'échappe, si bien que la chambre parvient presque à la température visée. À partir de ce moment, la chaudière s'éteint et se rallume régulièrement de manière à compenser la déperdition constante.

Dans notre simulation, le thermostat est réglé sur 18 °C, mais la température de la pièce se stabilise légèrement en dessous. Cela s'explique par le fait que la perte de chaleur se poursuit tandis que la chaudière reçoit le signal d'en introduire davantage dans le circuit de chauffage. Ce comportement qui peut surprendre est caractéristique d'un système soumis à la concurrence de plusieurs boucles régulatrices. C'est comme si vous vous efforciez de garder plein un seau dont le fond est percé. Pire encore, l'eau qui fuit est elle-même régie par une boucle de rétroaction ; plus il y a d'eau dans le seau, plus la pression s'accroît au niveau du trou, et plus la fuite augmente ! Dans le cas du réchauffement de la chambre, plus cette dernière est chaude, plus la déperdition vers l'extérieur est

importante. La chaudière met un moment à compenser cette perte accrue – et pendant ce temps-là, la chaleur s'échappe encore davantage. Avec une bonne isolation, la déperdition thermique sera plus lente et la maison plus confortable qu'une habitation passoire, même dotée d'une chaudière puissante.

Concernant les systèmes de chauffage domestique, les gens ont appris à régler leur thermostat légèrement au-dessus de la température qu'ils souhaitent atteindre. Mais il leur est difficile de savoir dans quelle proportion la majorer, étant donné que la déperdition s'accroît par temps froid. Toutefois, le problème est sans gravité pour ce qui est du chauffage individuel, chacun se débrouillant pour trouver le réglage qui lui convient.

Pour d'autres systèmes présentant des boucles régulatrices concurrentes, le fait que le stock continue à changer pendant que l'on s'efforce de le contrôler peut générer de véritables problèmes. Par exemple, supposons que vous souhaitiez maintenir le stock d'un magasin à un certain niveau. Vous ne pouvez pas le réapprovisionner à l'instant même où vous observez qu'il baisse. Si vous ne tenez pas compte des articles qui seront vendus pendant que vous attendez la livraison de votre commande, votre stock ne sera jamais suffisant. Vous risquez de commettre la même erreur lorsque vous tentez de maintenir à un niveau donné une trésorerie, un réservoir d'eau ou la concentration d'un produit chimique dans un mélange réactionnel fluctuant.

Un principe général important est ici à l'œuvre, ainsi qu'un principe spécifique au système de type thermostat. Commençons par le principe général. L'information délivrée par une boucle de rétroaction affecte uniquement les comportements à venir ; elle ne peut engendrer un signal et avoir un impact assez rapidement pour corriger le comportement qui a suscité ce retour d'information. Une personne au sein du système qui prend une décision sur la base du retour d'information n'a pas la capacité de modifier le comportement qui a entraîné ce retour d'information ; ses décisions affecteront uniquement le comportement futur.

> **L'information – physique ou non – qui est délivrée par une boucle de rétroaction affecte uniquement les comportements à venir ; elle ne peut engendrer un signal assez rapidement pour corriger le comportement qui a suscité ce retour d'information.** Même les informations non physiques mettent du temps à susciter une réponse du système.

Pourquoi est-ce important ? Parce que cela signifie qu'il y aura toujours un délai de réponse. Autrement dit, un flux ne réagit pas instantanément à un flux. Il peut seulement réagir à une modification de stock, et seulement après un court délai lui permettant d'enregistrer l'information. Dans le cas de la baignoire, il suffit d'une fraction de seconde pour évaluer la profondeur de l'eau et décider d'ajuster les flux. À cet égard, de nombreux modèles économiques se trompent en supposant que la consommation ou la production peuvent réagir immédiatement à un changement de prix, par exemple. C'est l'une des raisons pour lesquelles l'économie réelle a tendance à ne pas se comporter exactement comme bien des modèles économiques le prévoient.

Le principe spécifique que vous pouvez déduire de ce système simple est que dans le cas de systèmes de type thermostat, vous devez tenir compte des processus de déperdition ou d'apport qui interviennent. Sinon, votre stock n'atteindra pas le niveau désiré. Si vous souhaitez que votre chambre soit à 18 °C, vous devez régler le thermostat un petit peu plus haut. Si vous voulez payer avec votre carte de crédit (ou la dette publique), vous devez augmenter suffisamment votre taux de remboursement pour couvrir les frais liés à son utilisation (dont les intérêts). Si vous décidez d'accroître les effectifs de votre entreprise, vous devez recruter assez rapidement pour compenser les départs qui surviendront entre-temps. Autrement dit, votre modèle mental du système doit inclure tous les flux importants, faute de quoi vous serez surpris par son comportement.

> **L'objectif d'une boucle régulatrice visant le maintien d'un stock doit être déterminé de manière à compenser les processus entrants ou sortants qui affectent ce stock. Sinon, le processus de rétroaction fera parvenir le stock en deçà ou au-delà du niveau recherché.**

Avant d'en finir avec le thermostat, voyons comment il se comporte lorsque la température extérieure varie. La figure 19 représente le fonctionnement normal sur 24 heures d'un système opérationnel de chauffage à thermostat lorsque la température extérieure descend bien au-dessous de zéro durant la nuit. L'apport de chaleur reflète parfaitement la déperdition vers l'extérieur. Une fois que la pièce est chaude, la température ambiante varie à peine.

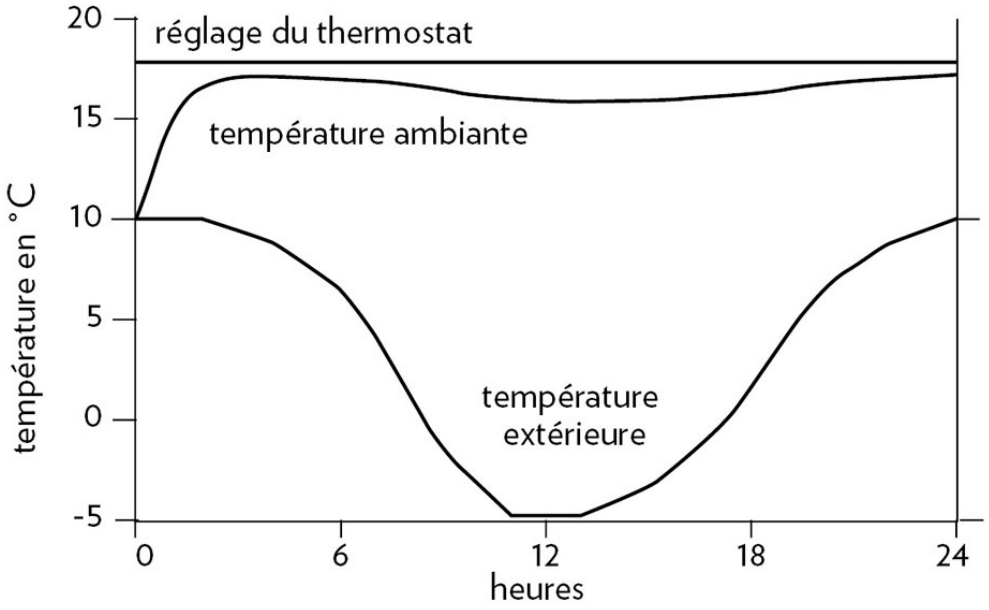


Figure 19. La chaudière fait parvenir une pièce froide à la température désirée tandis qu'une partie de la chaleur s'échappe dehors et que la température extérieure descend au-dessous de zéro.

Toute boucle de rétroaction régulatrice atteint son point de rupture lorsque d'autres boucles font dévier le stock plus fortement de son objectif qu'elle n'est capable de l'y ramener. Dans notre simulation de système de thermostat, cela peut se produire si je

réduis l'efficacité de la boucle chauffante (avec une chaudière moins puissante) ou si j'accrois l'influence de la boucle refroidissante (avec une température extérieure plus rigoureuse, une isolation moindre ou des fuites plus importantes). La figure 20 montre ce qui se passe avec des températures extérieures identiques à celles de la figure 19, mais avec une déperdition thermique plus rapide. Quand la température extérieure devient très basse, la chaudière ne parvient plus à compenser les pertes. Pendant quelques heures, la boucle qui s'efforce d'amener la température de la pièce jusqu'à celle du dehors domine le système. Et la chambre devient glaciale !

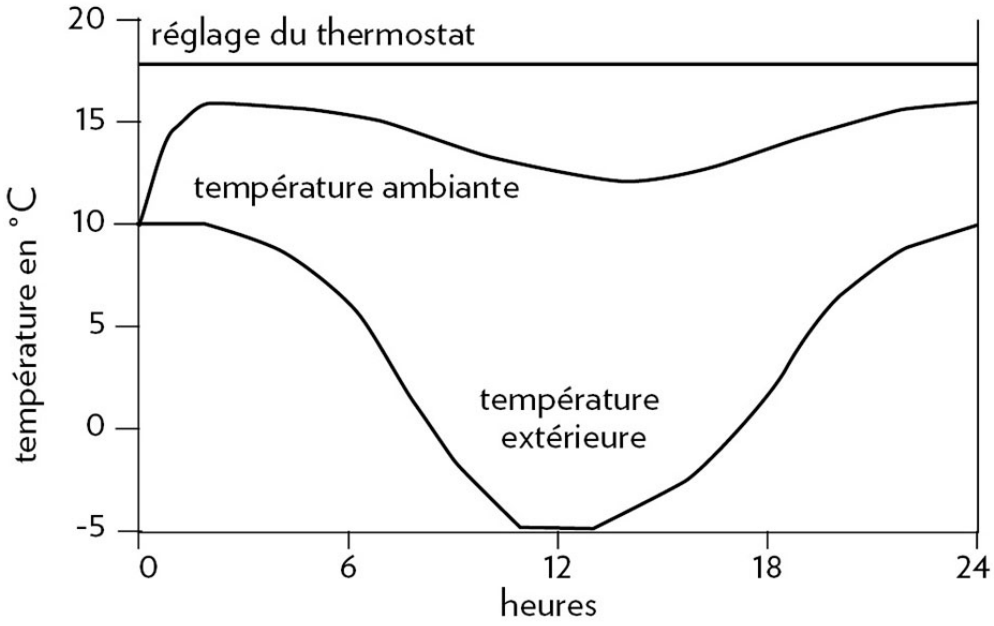


Figure 20. Par temps hivernal, la chaudière de cette maison passoire est incapable de maintenir la température à un niveau confortable.

Observez l'évolution des relations entre les différentes variables à la figure 20. Au départ la pièce est fraîche, à la même température que l'air extérieur. L'apport thermique de la chaudière excède la déperdition vers l'extérieur, si bien que la chambre se réchauffe. Pendant une ou deux heures, la température extérieure est suffisamment douce pour que la chaudière compense une grande

part de la déperdition thermique, si bien que la température ambiante reste proche de celle qui est désirée.

Mais plus la température extérieure baisse, plus la déperdition s'accroît et moins la chaudière parvient à compenser cet écart. Étant donné que la chaudière génère moins de chaleur qu'il ne s'en échappe dehors, la température de la pièce diminue. Puis la température extérieure remonte, la déperdition ralentit et la chaudière, fonctionnant toujours à plein régime, reprend enfin le dessus et recommence à réchauffer la chambre.

Comme pour la baignoire, lorsque la chaudière fournit davantage de chaleur qu'il ne s'en évacue à l'extérieur, la température ambiante s'élève. Quand le flux entrant devient moins rapide que le flux sortant, la température baisse. En observant les changements systémiques sur ce graphique et en les reliant au schéma des boucles de rétroaction de ce système, vous aurez une bonne idée de la manière dont les interactions structurelles de ce dernier – ses deux boucles de rétroaction et l'évolution de leurs forces relatives – affectent son comportement au fil du temps.

Un stock, une boucle amplificatrice et une boucle régulatrice – la population et l'économie industrielle

Que se passe-t-il lorsqu'une boucle amplificatrice et une boucle régulatrice influent sur le même stock ? C'est l'une des structures systémiques les plus courantes et les plus importantes qui existent. Entre autres, elle décrit chaque population et chaque économie.

Une population est dotée d'une boucle amplificatrice qui la fait croître par le biais de son taux de natalité et d'une boucle régulatrice qui tend à la réduire par son taux de mortalité.

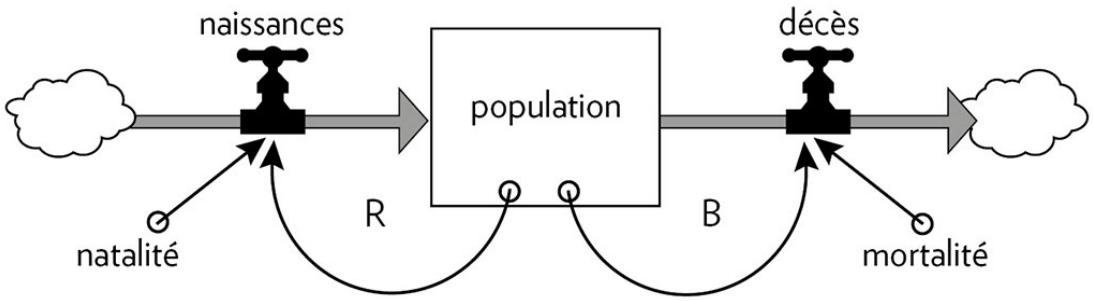


Figure 21. Population régie par la boucle amplificatrice des naissances et la boucle régulatrice des décès.

Quand la natalité et la mortalité sont constantes (ce qui est rarement le cas), ce système a un comportement simple. Il s'accroît ou diminue exponentiellement selon que sa boucle amplificatrice déterminant les naissances surpasse sa boucle régulatrice déterminant les décès, ou inversement.

Par exemple, la population mondiale, qui comptait 6,6 milliards d'êtres humains en 2007, avait un taux de natalité d'environ 21 naissances pour 1000 habitants et un taux de mortalité de 9 pour 1 000. Les naissances étant supérieures aux décès, la boucle amplificatrice dominait le système. Si ces taux restent inchangés, un enfant né en 2008 verra que la population mondiale aura plus que doublé lorsqu'il atteindra l'âge de 60 ans, comme indiqué à la figure 22.

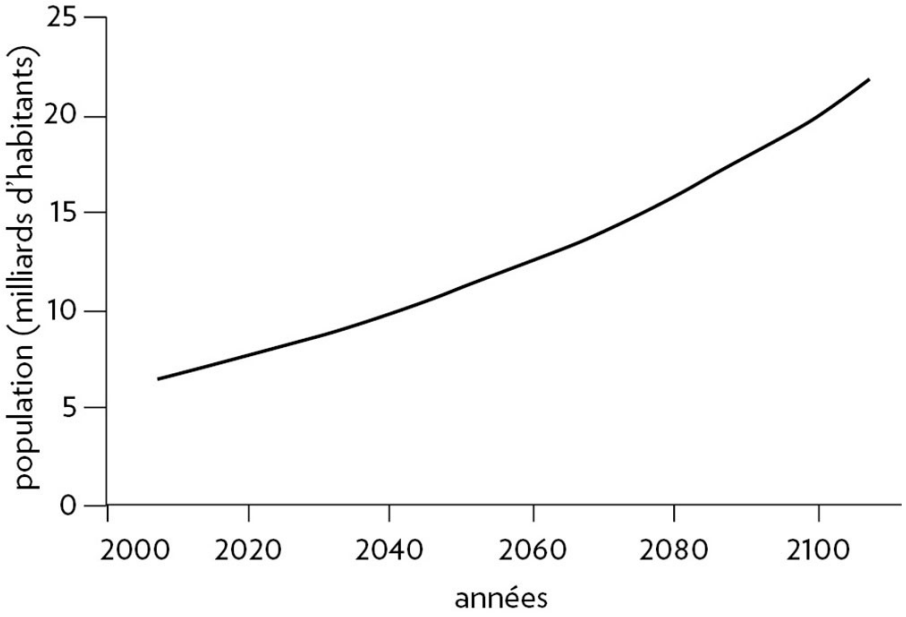


Figure 22. Croissance démographique si la natalité et la mortalité restent à leurs niveaux de 2007 de 21 naissances et 9 décès pour 1 000 habitants.

En revanche, si du fait d'une terrible maladie le taux de mortalité passait par exemple à 30 décès pour 1 000 avec un taux de natalité restant à 21, la boucle des décès viendrait à dominer le système. Plus de gens mourraient qu'il en naîtrait chaque année, si bien que la population diminuerait progressivement (figure 23).

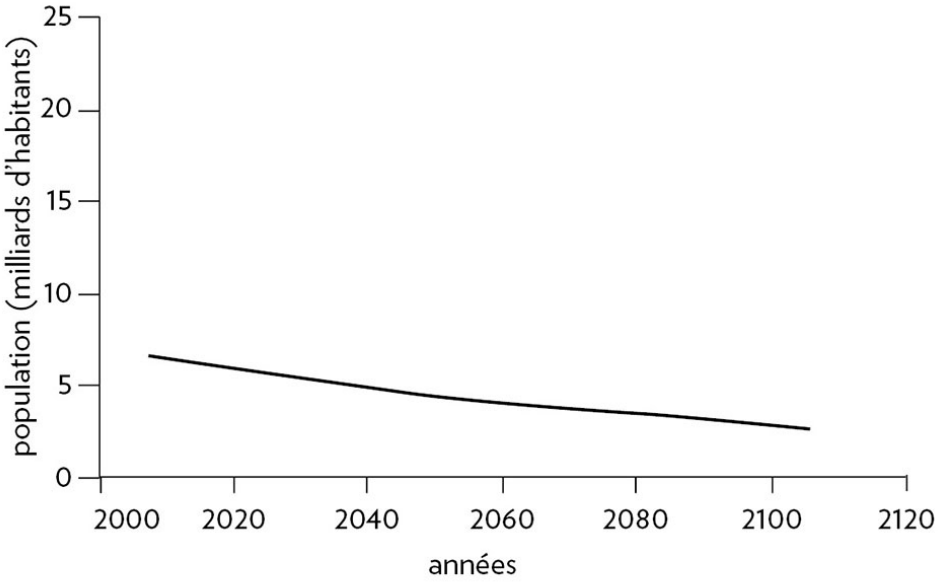


Figure 23. Déclin démographique si la natalité reste à son niveau de 2007 (21 naissances pour 1 000) alors que la mortalité atteint 30 décès pour 1 000 habitants.

Les choses deviennent plus intéressantes lorsque la natalité et la mortalité changent au fil du temps. Quand les Nations unies font des projections démographiques à long terme, elles supposent en général que le taux moyen de natalité diminuera (approchant le seuil de renouvellement où chaque femme aurait en moyenne 1,85 enfant) à mesure que les pays seront de plus en plus développés. Jusque récemment, on supposait que la mortalité irait elle aussi en diminuant, quoique plus lentement (car elle est déjà basse dans la majeure partie du monde). Cependant, du fait de l'épidémie de sida, l'ONU estime que la tendance de l'espérance de vie à augmenter au cours des 50 prochaines années ralentira dans les régions affectées par cette maladie.

La modification des flux (natalité et mortalité) entraîne un changement de comportement du stock (population) avec le temps – et une transformation de la courbe. Par exemple, si la natalité mondiale baissait régulièrement jusqu'à égaler la mortalité en 2035 et qu'elles restaient toutes deux constantes dès lors, la population se

stabiliserait car les naissances compenseraient exactement les décès en un équilibre dynamique, comme illustré à la figure 24.

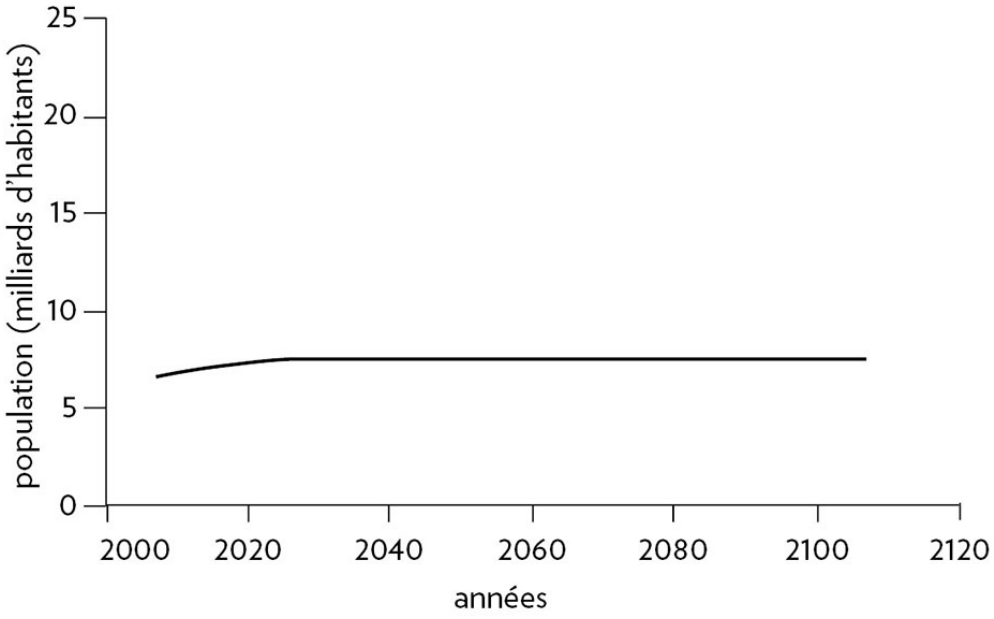


Figure 24. La population devient stable quand la natalité est égale à la mortalité.

Ce comportement offre un exemple de **prédominance relative** des boucles de rétroaction. La prédominance est une notion importante de la pensée systémique. Lorsqu'une boucle l'emporte sur une autre, elle influe davantage sur le comportement du système. Et sachant que, bien souvent, plusieurs boucles de rétroaction concurrentes opèrent simultanément, celles qui prédominent déterminent le comportement du système.

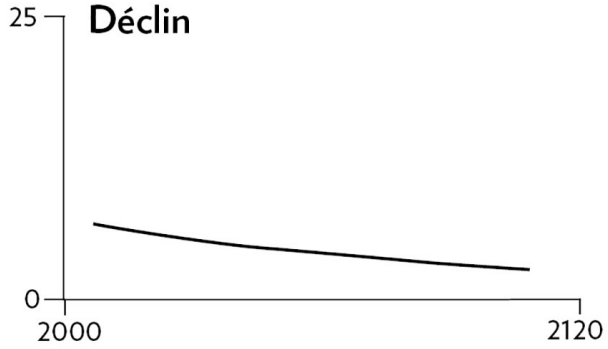
Dans un premier temps, quand la natalité est supérieure à la mortalité, la boucle amplificatrice domine le système et le comportement qui en résulte est une croissance exponentielle. Mais cette boucle s'affaiblit progressivement à mesure que la natalité baisse, jusqu'à atteindre une force identique à celle de la boucle régulatrice de la mortalité. À ce stade, aucune des deux boucles ne domine plus. Le système est parvenu à l'équilibre dynamique.

Vous avez déjà observé ce phénomène de prédominance relative avec le système du thermostat, lorsque la température extérieure chute et que la chaleur s'échappant d'une maison mal isolée dépasse

la capacité de la chaudière à réchauffer la pièce. La boucle chauffante perd alors sa prédominance au profit de la boucle refroidissante.

> **Un système témoigne souvent de comportements complexes lorsque les forces relatives de ses boucles de rétroaction changent, entraînant successivement la prédominance de l'une par rapport à l'autre et inversement.**

Un système démographique n'a pas trente-six manières de se comporter, et celles-ci dépendent des variables « clés » que sont la natalité et la mortalité. Ce sont les seuls facteurs qui entrent en ligne de compte dans un système simple comportant une boucle amplificatrice et une boucle régulatrice. Un stock régi par ces deux boucles liées augmentera exponentiellement si la première domine la seconde. Il se stabilisera si les deux boucles sont de force équivalente (voir figure 25). Ou bien il alternera entre ces différents comportements si les forces relatives des deux boucles changent au fil du temps (voir figure 26).



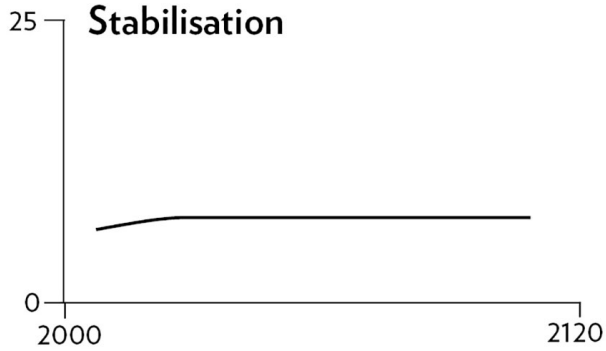


Figure 25. Trois comportements possibles pour une population : la croissance,le déclin ou la stabilisation.

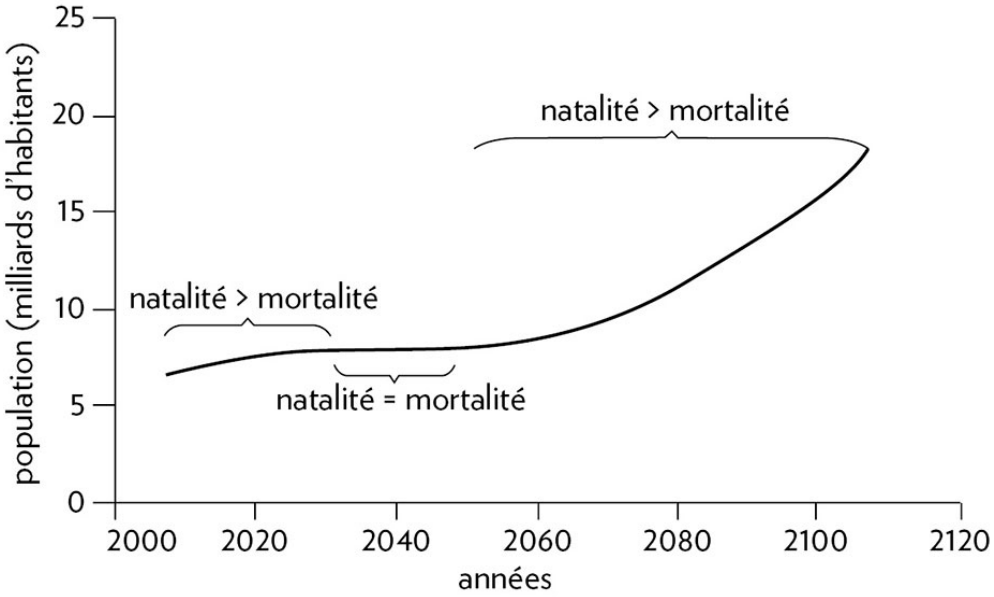


Figure 26. Prédominance relative des boucles de natalité et de mortalité.

J'ai ici choisi des scénarios démographiques extrêmes afin d'illustrer un point relatif aux modèles et aux scénarios qu'ils peuvent engendrer. Lorsque vous êtes aux prises avec un scénario (ce qui arrive à chaque fois que vous entendez parler d'une prévision économique, d'un budget d'entreprise, d'un bulletin météorologique, des changements climatiques à venir, de l'analyse d'un courtier à propos d'un titre particulier), vous devez vous poser

un certain nombre de questions pour savoir dans quelle mesure le modèle sous-jacent est une bonne représentation de la réalité :

• Les facteurs clés interviendront-ils comme prévu ? (Comment évolueront les taux de natalité et de mortalité ?)

• Si c'est le cas, le système réagira-t-il comme annoncé ? (Les taux de natalité et de mortalité influeront-ils vraiment sur le stock démographique comme nous l'avons imaginé ?)

• Qu'est-ce qui influe sur les facteurs clés ? (Qu'est-ce qui affecte les taux de natalité et de mortalité ?)

Vous ne pourrez répondre à la première question de manière factuelle. Il s'agit d'une prévision sur l'avenir, lequel est par essence incertain. Même si vous avez de solides convictions à cet égard, rien ne pourra prouver que vous avez raison avant que le futur se soit réalisé. Une analyse systémique est capable de tester un certain nombre de scénarios afin d'envisager ce qui se passera en fonction de différentes évolutions des facteurs clés. C'est généralement l'un des objectifs d'une analyse systémique. Mais il vous appartient de juger lequel parmi ces scénarios pourrait sérieusement être considéré comme un avenir possible.

D'ordinaire, les études de systèmes dynamiques ne sont pas conçues pour *prédire* ce qui arrivera, mais plutôt pour explorer *ce qui arriverait* si un certain nombre de facteurs clés évoluaient de telle ou telle manière.

La deuxième question – le système réagira-t-il comme annoncé ? – est plus scientifique. Il s'agit de savoir à quel point le modèle est bon. Reflète-t-il la dynamique inhérente au système ? Peu importe votre avis sur le fait que les facteurs clés évolueront de telle manière, *le système se comporterait-il ainsi* dans le cas où cela adviendrait ?

> **Les modèles de systèmes dynamiques explorent les futurs envisageables en posant la question : « Et si cela se produisait ? »**

Dans les scénarios démographiques illustrés ci-dessus, peu importe dans quelle mesure leur survenue vous semble probable, la

réponse à cette deuxième question est globalement oui – la population se comportera de telle façon si la natalité et la mortalité évoluent de telle façon. Le modèle démographique que j'ai employé ici est très basique. Un modèle plus élaboré distinguerait par exemple un certain nombre de tranches d'âge. Toutefois, ce modèle réagit de la manière dont le ferait une population réelle, l'accroissement et le déclin advenant dans les mêmes conditions. Les chiffres sont fictifs, mais le schéma comportemental est fondamentalement réaliste.

QUESTIONS POUR TESTER LA VALEUR D'UN MODÈLE

1. **Les facteurs clés interviendront-ils comme prévu ?**
2. **Si c'est le cas, le système réagira-t-il comme annoncé ?**
3. **Qu'est-ce qui influe sur les facteurs clés ?**

Vient enfin la troisième question. Qu'est-ce qui influe sur les facteurs clés ? Qu'est-ce qui régule les flux entrants et sortants ? Cette question a trait aux limites du système. Elle nécessite un examen approfondi de ces facteurs pour savoir s'ils sont véritablement indépendants ou s'ils sont eux aussi imbriqués dans le système.

Par exemple, la taille de la population pourrait-elle à son tour influer d'une manière ou d'une autre sur la natalité ou la mortalité ? D'autres facteurs – l'économie, l'environnement, les tendances sociales – agissent-ils sur la natalité et la mortalité ? La taille de la population affecte-t-elle ces facteurs économiques, environnementaux et sociaux ?

Bien entendu, la réponse à toutes ces questions est oui. La natalité et la mortalité sont elles aussi régies par des boucles de rétroaction, dont une partie au moins est elle-même affectée par la taille de la population. Cet « animal » qu'est la population représente un seul élément d'un système beaucoup plus large[3].

> **L'utilité d'un modèle repose non pas sur le fait que les scénarios qui le sous-tendent soient réalistes (car nul ne peut le savoir avec certitude), mais sur le fait qu'il réponde par un schéma comportemental réaliste.**

L'économie est un élément important du système élargi qui affecte la population. Au cœur de l'économie se trouve un autre système doté d'une boucle de rétroaction amplificatrice et d'une boucle régulatrice – avec les mêmes types de structure et de comportements que la population (voir figure 27).

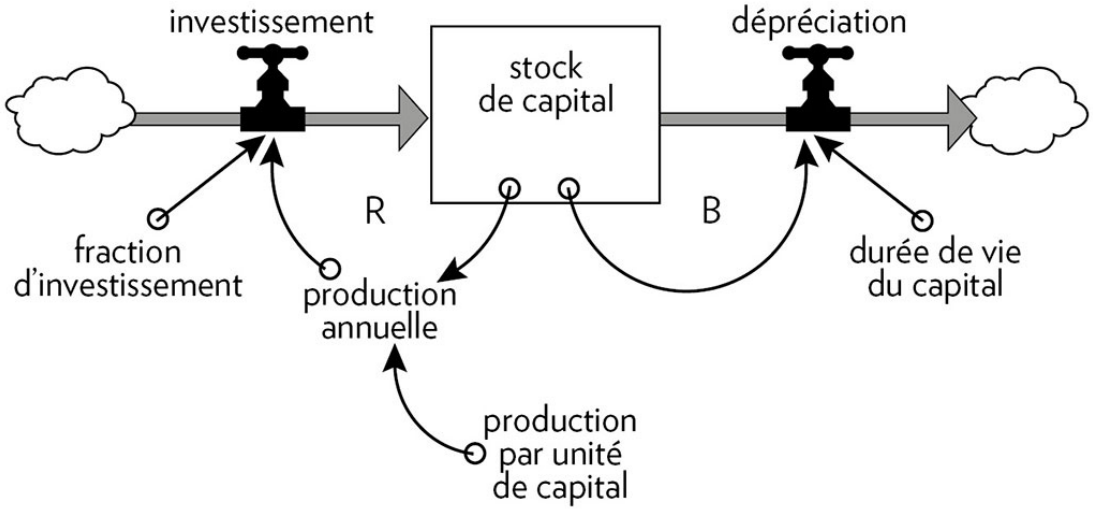


Figure 27. À l'instar d'une population vivante, le capital économique est doté d'une boucle amplificatrice (investissement suscité par la production) qui régit la croissance et d'une boucle régulatrice (dépréciation) qui régit le déclin.

Plus le stock de capital physique (machines et usines) d'une économie et l'efficacité de la production (rendement par unité de capital) sont importants, plus la production (de biens et services) est susceptible d'augmenter chaque année.

Plus la production augmente, plus l'on peut investir afin d'accroître le capital. Il s'agit d'une boucle amplificatrice, à l'instar des naissances pour une population. La fraction d'investissement équivaut à la natalité. Plus la fraction de production réinvestie par

une société est importante, plus son stock de capital augmente rapidement.

Par ailleurs, le capital physique est amoindri par la dépréciation – l'obsolescence et l'usure. La boucle régulatrice contrôlant la dépréciation équivaut aux décès dans une population. La « mortalité » du capital est déterminée par sa durée de vie moyenne. Plus cette dernière est longue, moins la fraction de capital à retirer ou à remplacer chaque année est importante.

Si ce système présente la même structure que celui de la population, il a sans doute le même éventail de comportements. Dans l'histoire récente, le capital mondial, tout comme la population, a été dominé par sa boucle amplificatrice et s'est accru exponentiellement. Le fait qu'à l'avenir il poursuive sa croissance, qu'il stagne ou qu'il décline sera fonction de la prééminence de sa boucle amplificatrice sur sa boucle régulatrice dépréciatrice. Ce qui dépendra de :

- la fraction d'investissement – quelle part de la production la société investira au lieu de la consommer ;
- l'efficacité du capital – combien de capital il lui faudra pour générer un certain volume de production ;
- la durée de vie moyenne du capital.

Si la fraction de la production réinvestie dans le capital est constante et si l'efficacité du capital (son aptitude à générer une production) est également constante, le stock de capital pourra diminuer, rester stable ou croître selon la durée de vie du capital. Les courbes de la figure 28 illustrent l'évolution de trois systèmes dont le stock de capital présente différentes durées de vie moyennes. Avec une durée de vie relativement courte, l'usure du capital est plus rapide que son remplacement. Le réinvestissement n'est pas à la hauteur de la dépréciation et l'économie décline progressivement. Quand l'investissement compense juste la dépréciation, l'économie est à l'équilibre dynamique. En revanche, avec une durée de vie importante, le stock de capital témoigne d'une croissance exponentielle. Plus le capital a une durée de vie longue, plus il s'accroît rapidement.

C’est un nouvel exemple du principe que nous avons déjà rencontré, selon lequel on peut aussi bien accroître un stock en réduisant la vitesse du flux sortant qu’en augmentant celle du flux entrant !

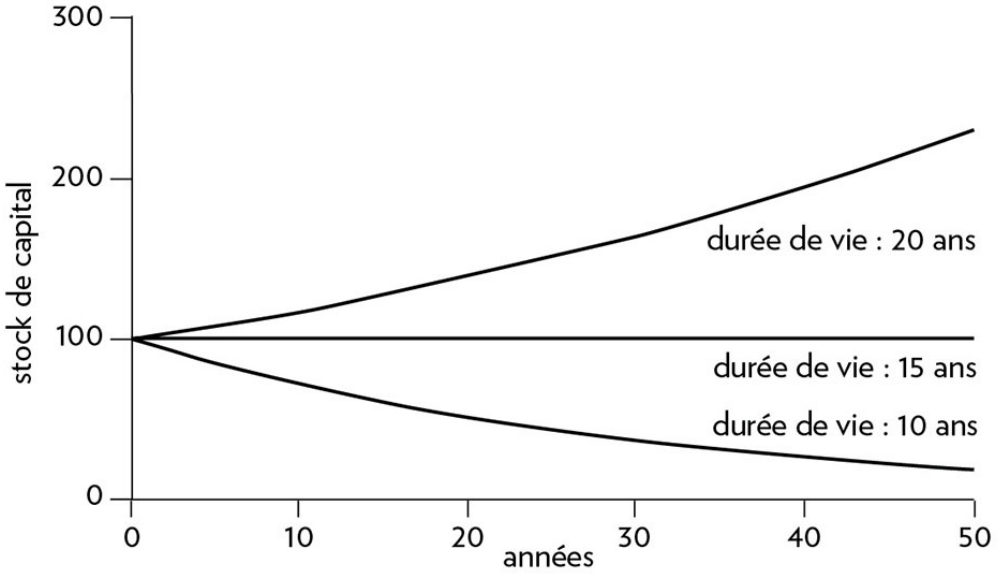


Figure 28. Évolution du stock de capital en fonction de sa durée de vie. Dans le cas d’un système où le ratio de production par unité de capital est de 1 pour 3 et où la fraction d’investissement est de 20 %, un capital dont la durée de vie est de 15 ans compense juste sa dépréciation. Une durée de vie inférieure entraîne le déclin du stock de capital.

Tout comme de nombreux facteurs influent sur la natalité et la mortalité d’une population, de nombreux paramètres ont des répercussions sur le ratio de production, la fraction d’investissement et la durée de vie du capital d’une société – les taux d’intérêt, la technologie, la politique fiscale, les habitudes de consommation, les prix, pour n’en citer que quelques-uns. D’ailleurs, la population influe elle-même sur l’investissement, aussi bien en procurant de la main-d’œuvre pour la production qu’en accroissant la demande en produits de consommation, réduisant de ce fait la fraction d’investissement. En outre, la production agit à son tour sur la population de bien des manières. Une société plus riche bénéficie généralement de meilleurs services de santé ainsi que d’un moindre

taux de mortalité. Le plus souvent, elle présente aussi un taux de natalité inférieur.

En fait, à peu près toute modélisation à long terme d'une économie réelle devrait relier les deux structures de la population et du capital afin de montrer comment elles influent l'une sur l'autre. La question centrale du développement économique est de parvenir à empêcher la boucle amplificatrice de l'accumulation du capital de croître plus lentement que la boucle amplificatrice de la population – afin que les gens deviennent plus riches et non plus pauvres[4].

Il vous semblera peut-être étrange que je mette le système capitaliste dans le même groupe d'« animaux du zoo » que le système de la population. Un système productif avec ses usines, ses expéditions de marchandises et ses flux économiques ne ressemble guère à un système démographique avec ses bébés qui naissent, grandissent, procréent à leur tour et meurent. Mais d'un point de vue systémique, ces deux systèmes si dissemblables à tant d'égards ont une chose importante en commun : leur structure en boucles de rétroaction. Tous deux ont un stock régi par une boucle amplificatrice de croissance et une boucle régulatrice de mortalité. Tous deux sont également soumis à un processus de vieillissement. Les aciéries, les laminoirs et les turbines déclinent et meurent à l'instar des êtres humains.

L'une des notions centrales de la théorie systémique, aussi essentielle que l'observation selon laquelle les systèmes génèrent en grande partie leur propre comportement, est que les systèmes dotés de structures de rétroaction similaires occasionnent des comportements dynamiques similaires, quand bien même leur apparence est totalement différente.

Une population ne ressemble en rien à une économie industrielle, sauf qu'elles sont toutes deux capables de se reproduire à partir d'elles-mêmes et par conséquent de croître exponentiellement. Et toutes deux vieillissent et meurent. Une tasse de café qui refroidit s'apparente à une chambre qui baisse en température, à une substance radioactive qui se désintègre ou à une population ou à une économie qui prend de l'âge et périt. Chacune décline du fait d'une boucle de rétroaction régulatrice.

Les systèmes dotés de structures de rétroaction similaires occasionnent des comportements dynamiques similaires.

Un système soumis à des délais – le stock d'une entreprise

Imaginez le stock d'un commerçant – un concessionnaire automobile – avec le flux entrant des véhicules livrés par les usines et le flux sortant des nouvelles ventes. Un tel parc automobile devrait se comporter comme le stock d'eau contenu dans une baignoire.

Maintenant, imaginez un système de régulation destiné à maintenir le stock à un niveau permettant d'assurer 10 jours de ventes (voir figure 29). Le concessionnaire doit garder un certain nombre de véhicules en réserve, car les livraisons et les acquisitions ne sont pas parfaitement synchronisées. Les achats des clients ne sont pas prévisibles au jour le jour. En outre, le concessionnaire doit prévoir une marge supplémentaire (un stock tampon) au cas où ses fournisseurs livreraient avec du retard.

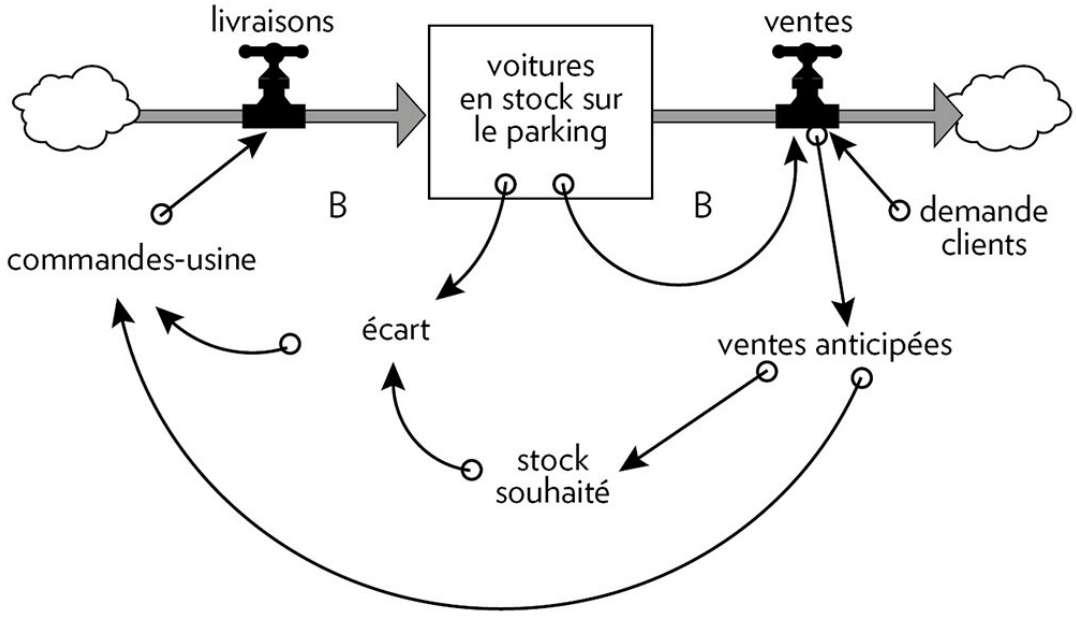


Figure 29. Le stock d'un concessionnaire automobile reste stable sous l'effet de deux boucles régulatrices concurrentes : celle des ventes et celle des livraisons.

Le concessionnaire surveille les ventes afin de les anticiper. Si par exemple elles font mine d'augmenter, il ajustera ses commandes à l'usine pour amener son parc au niveau souhaité de façon à assurer 10 jours de ventes à un rythme accru. Ainsi, une hausse des ventes implique une hausse des ventes anticipées qui entraîne un accroissement de l'écart entre le stock réel et le stock désiré, lequel nécessite une augmentation des commandes qui entraînera des livraisons supplémentaires, lesquelles accroîtront le stock de manière à répondre aisément à la hausse des ventes.

Ce système s'apparente à celui du thermostat – la boucle régulatrice des ventes vide le parc tandis que la boucle régulatrice concurrente stabilise le stock en remplaçant les voitures écoulées. La figure 30 illustre, sans grande surprise, ce qui se produit lorsque la demande des clients augmente de 10 %.

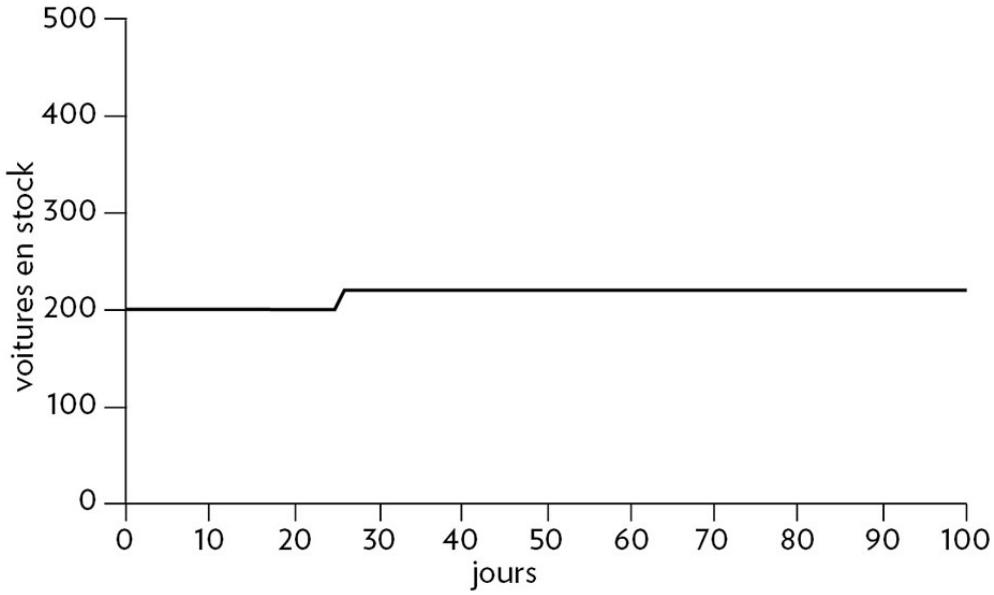


Figure 30. Stock d'un concessionnaire automobile avec un accroissement pérenne de 10 % de la demande à partir du jour 25.

À la figure 31, j'ajoute d'autres éléments à ce modèle simple : trois délais qui sont typiques de ce que nous rencontrons dans le monde réel.

Premièrement, il y a un délai d'anticipation qui est intentionnel dans ce cas. Le concessionnaire ne réagit pas à la moindre anomalie des ventes. Avant de passer commande, il observe la moyenne des ventes sur les 5 jours précédents afin de distinguer les véritables tendances des pics et creux temporaires.

Deuxièmement, il y a un délai de réponse. Même lorsqu'il est convaincu de la nécessité d'un ajustement, le concessionnaire ne redresse pas totalement la barre en une seule commande. Il compense le manque seulement d'un tiers à chaque commande. Autrement dit, il procède à des ajustements partiels sur 3 jours pour vérifier la réalité de la tendance. Troisièmement, il existe un délai de livraison. L'usine met 5 jours à enregistrer la commande, à la traiter et à livrer les véhicules au concessionnaire.

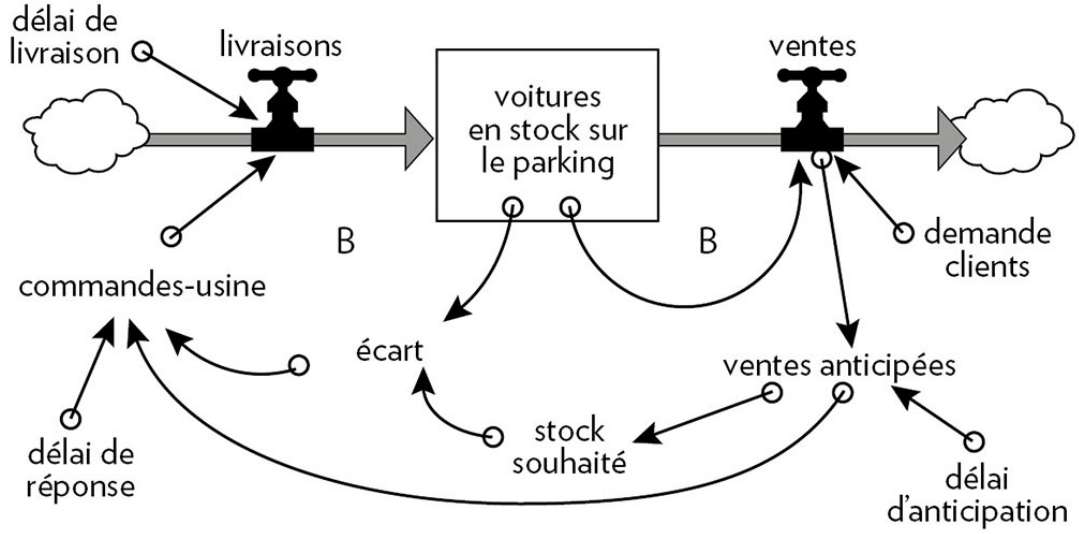


Figure 31. Stock d'un concessionnaire automobile incluant trois délais courants d'anticipation, de réponse et de livraison.

Bien que ce système consiste seulement en deux boucles régulatrices, à l'instar du thermostat simplifié, il ne se comporte pas comme ce dernier. Voyez par exemple à la figure 32 ce qui se produit quand l'entreprise connaît le même accroissement pérenne de 10 % de ses ventes résultant d'une hausse de la demande.

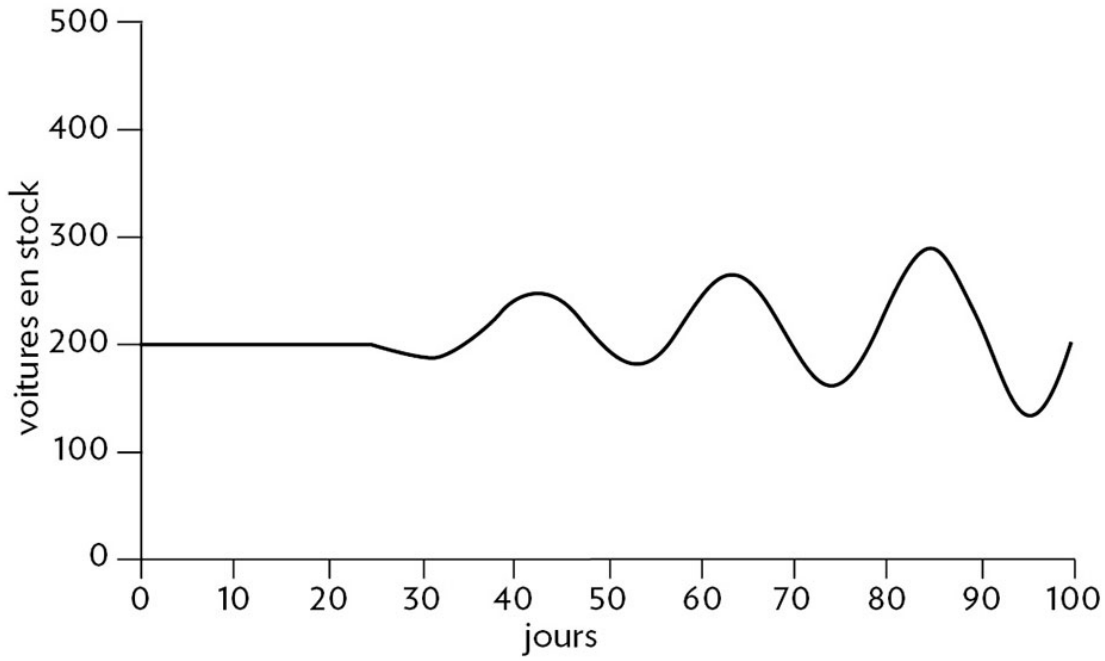


Figure 32. Réaction du stock à un accroissement pérenne de 10 % de la demande lorsque le système inclut des délais.

Des oscillations ! Un léger accroissement des ventes entraîne une baisse du stock. Le concessionnaire observe les ventes suffisamment longtemps pour s'assurer que cette hausse de la demande va durer. Puis il se met à commander davantage de voitures aussi bien pour satisfaire la demande accrue que pour augmenter le niveau du stock. Cependant, les véhicules mettent un certain temps à arriver. Sachant qu'entre-temps le stock continue de baisser, il faut augmenter un peu plus les commandes afin de ramener le stock au niveau pour assurer 10 jours de ventes.

Enfin le volume accru de voitures commandées se met à arriver, si bien que le stock se reconstitue – et devient même excessif, car du fait de l'incertitude sur la tendance des ventes, le concessionnaire a trop commandé. S'apercevant de son erreur, il réduit ses commandes. Et puisque les précédentes commandes majorées continuent d'arriver, il commande encore moins de véhicules. Inévitablement, il en commande trop peu car il n'est pas certain de ce qui se passera ensuite. Le stock devient alors à nouveau

insuffisant. Et ainsi de suite, si bien que le parc oscille autour du nouveau niveau de stock désiré. Comme en témoigne la figure 33, ajouter quelques délais fait une sacrée différence !

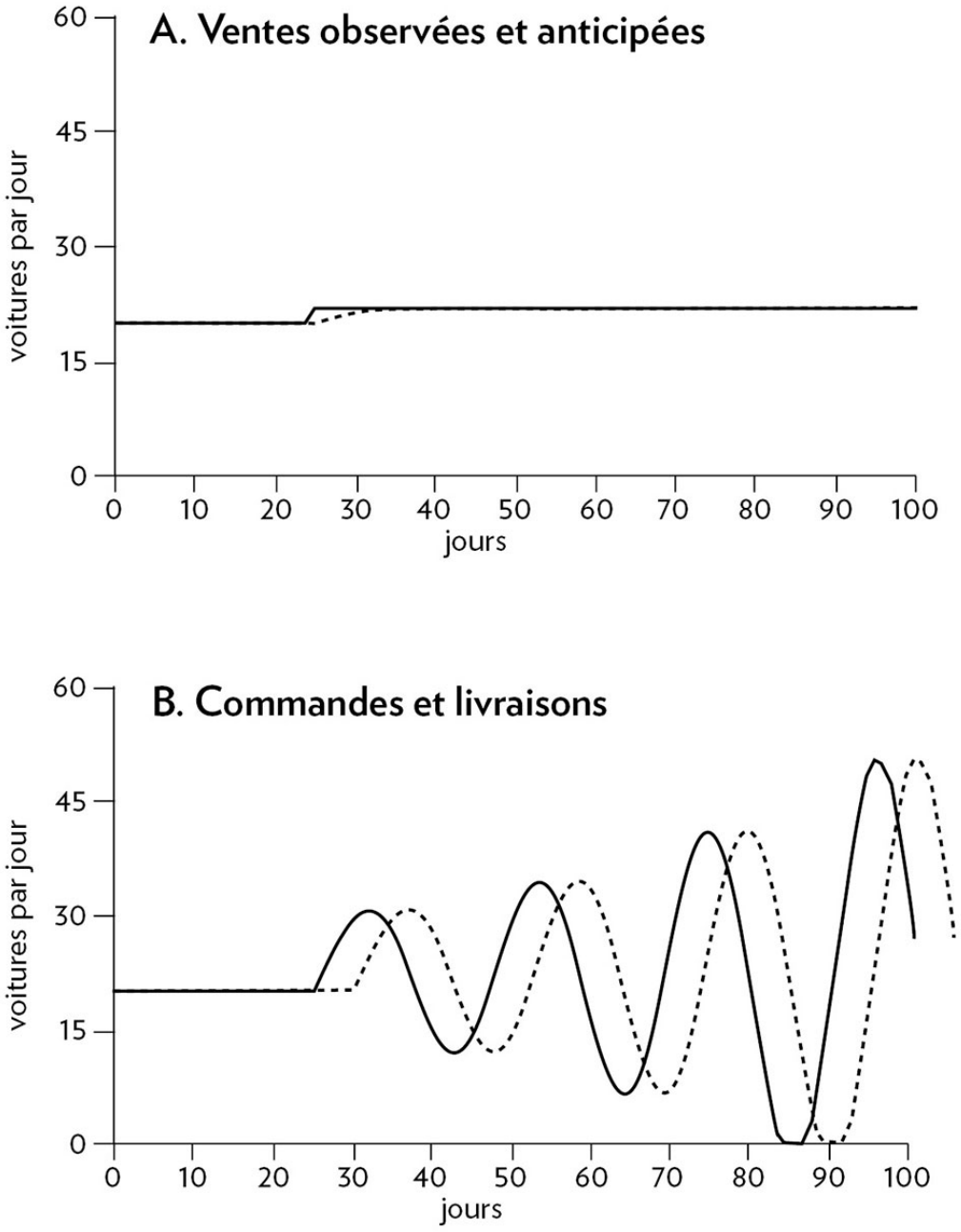


Figure 33. Évolution des commandes et des livraisons en réponse à une hausse de la demande. Le graphique A illustre la hausse légère mais soudaine des ventes au jour 25, ainsi que les ventes « anticipées » par le concessionnaire (pointillés), lequel lisse l'évolution de la demande sur 3 jours. Le graphique B montre la fluctuation des commandes qui en résulte, suivie de celle des livraisons en provenance de l'usine (pointillés).

Nous verrons bientôt qu'il existe des moyens pour atténuer ces oscillations du stock. Néanmoins, il importe en premier lieu de comprendre les raisons de leur survenue. Ce n'est pas parce que le concessionnaire est stupide, mais parce qu'il intervient dans un système où il ne dispose pas et ne peut disposer des informations en temps voulu, et où du fait de certains délais physiques, ses actions n'influent pas immédiatement sur le stock. Le concessionnaire ignore ce que sa clientèle va faire. Et quand celle-ci agit d'une manière, il n'est pas certain qu'elle continuera de le faire. Lorsqu'il passe commande, la réponse n'est pas immédiate. Ce défaut d'information et ces délais physiques sont très courants. On observe fréquemment ce type d'oscillations avec les stocks de marchandises ainsi qu'avec de nombreux autres systèmes. Si vous essayez un jour de prendre une douche lorsqu'un tuyau très long sépare le mitigeur du pommeau, vous expérimenterez directement les joies des oscillations de température dues à un long délai de réponse.

> **Un délai intervenant dans une boucle de rétroaction régulatrice rend le système susceptible d'osciller.**

Or il n'est pas simple de déterminer quel délai entraînera quel type d'oscillations dans quelles circonstances. Ce système qu'est le parc automobile va me permettre de vous montrer pourquoi.

« Ces oscillations sont intolérables, s'exclame le concessionnaire (qui est lui-même un système apprenant résolu à modifier le comportement du système qu'est le stock). Je vais réduire les délais. Puisque je ne peux guère influer sur les délais de livraison de l'usine, je vais moi-même réagir plus vite. J'ajusterai mes commandes en me basant sur la tendance moyenne des ventes sur 2 jours au lieu de 5. »

La figure 34 montre ce qui se passe lorsque le délai d'anticipation du concessionnaire est réduit de 5 à 2 jours.

Cela ne change pas grand-chose, hormis le fait que l'oscillation du stock de voitures s'amplifie légèrement. Et si au lieu de raccourcir son délai d'anticipation, le concessionnaire tente d'écourter son temps de réaction – en compensant les baisses anticipées sur 2 jours

au lieu de 3 –, l'oscillation s'aggrave encore davantage, comme le montre la figure 35.

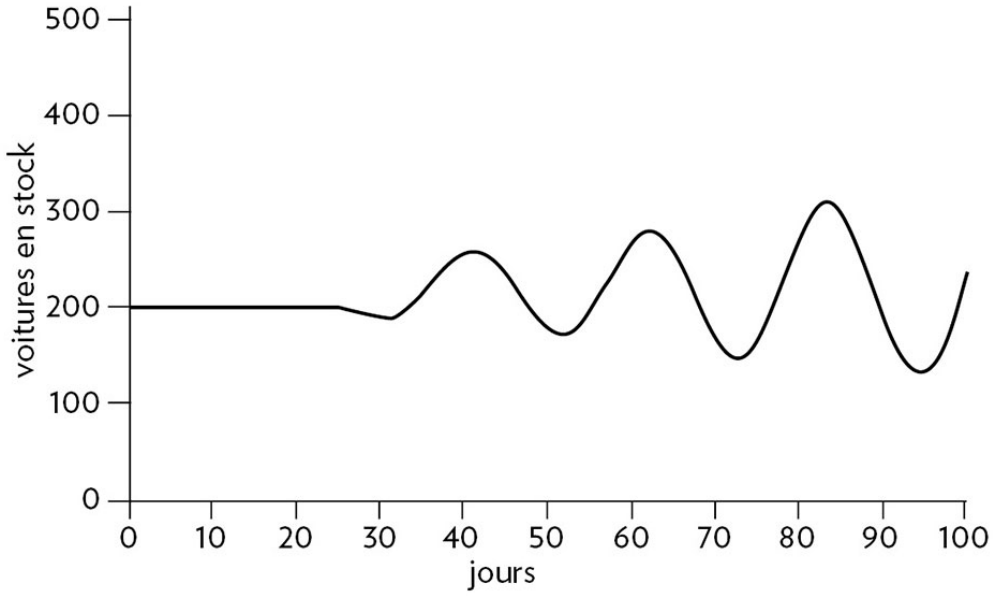


Figure 34. Réponse du stock au même accroissement de la demande avec un délai d'anticipation moindre.

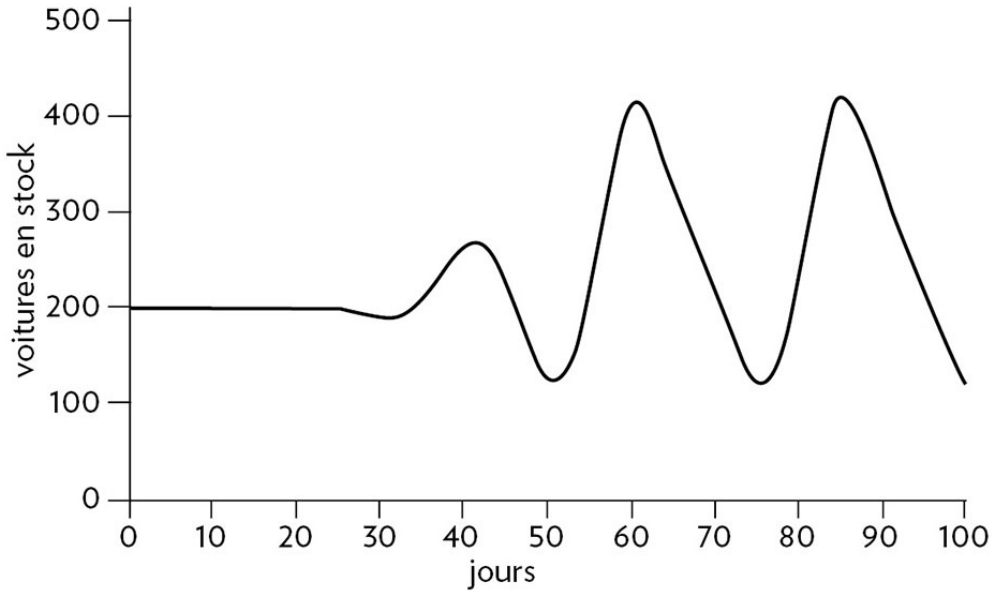


Figure 35. Réponse du stock au même accroissement de la demande en raccourcissant le délai de réaction. Plus on réagit vite, plus les oscillations augmentent !

Il faut que cela change. Et puisque ce système comporte une personne apprenante, changement il y aura. « Gros effet de levier, mauvaise direction », se dit le concessionnaire-penseur systémique en constatant l'échec de sa tentative de stabilisation des oscillations. On observe très souvent ce type d'effet pervers : en essayant de remédier à la défaillance d'un système, une personne est intuitivement attirée par un levier d'action qui a de fortes répercussions sur le système. Et nonobstant ses bonnes intentions, elle actionne le levier dans la mauvaise direction ! C'est un exemple parmi d'autres de la manière dont le comportement contre-intuitif des systèmes peut nous surprendre lorsque nous essayons de les modifier.

Ici, le problème réside en partie dans le fait que le concessionnaire a réagi non pas trop lentement, mais trop vite. Étant donné la configuration de ce système, le vendeur a surréagi. La situation se serait améliorée si, au lieu de réduire son délai de réponse de 3 à 2 jours, il l'avait porté à 6 jours. À la figure 36, on observe en effet une atténuation considérable des oscillations qui permet au système de parvenir à un nouvel équilibre.

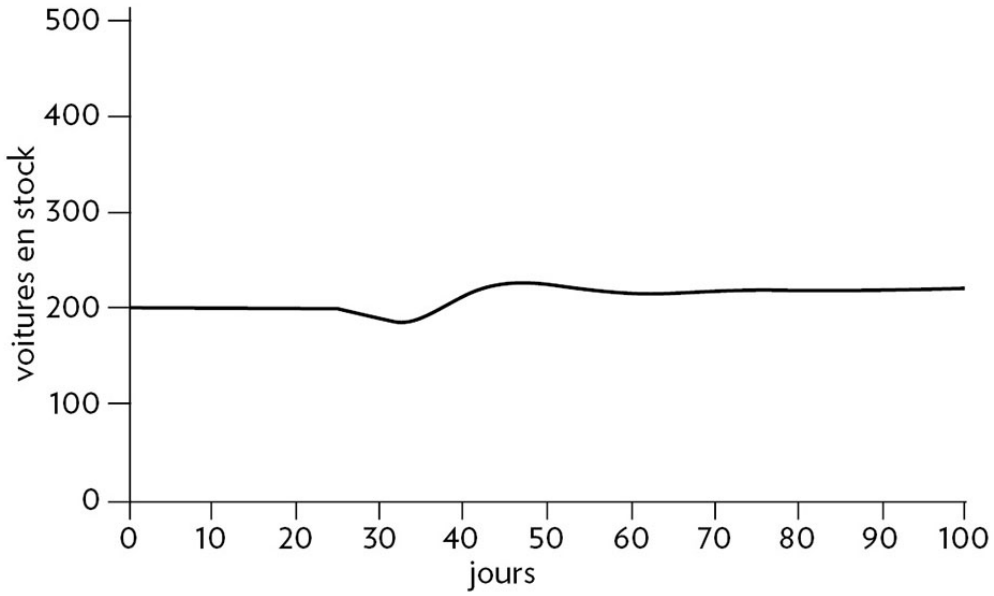


Figure 36. Réponse du stock au même accroissement de la demande avec une réaction plus lente.

Dans ce système, le délai le plus important est celui sur lequel le concessionnaire n'a pas de contrôle direct : la livraison des véhicules par l'usine. Cependant, même s'il n'a pas la possibilité de modifier cette partie du système, il peut apprendre à gérer son stock de manière efficace.

> Omniprésents au sein des systèmes, les délais influent considérablement sur leur comportement.
> **La modification d'un délai peut entraîner** (ou non, selon le type de délai et l'ampleur relative des autres délais) **un changement majeur dans le comportement d'un système.**

La modification d'un délai au sein d'un système peut rendre ce dernier beaucoup plus facile ou beaucoup plus difficile à gérer. Vous comprenez ainsi pourquoi nous autres penseurs systémiques faisons une telle fixation sur les délais. Nous sommes toujours aux aguets concernant l'endroit où ces délais surviennent dans un système, leur ampleur et leur nature – qu'ils affectent les flux d'informations ou les processus physiques. Nous ne pouvons comprendre la dynamique d'un système avant de connaître la localisation et l'importance des délais. Et nous savons que certains délais peuvent être de puissants leviers d'action. Le fait de les allonger ou de les raccourcir peut entraîner des changements majeurs dans le comportement d'un système.

Vus de loin, les problèmes de stock d'un commerçant peuvent sembler insignifiants et solubles. Mais imaginez que le stock comprenne l'ensemble des véhicules en vente aux États-Unis. La hausse ou la baisse des commandes de voitures affectera non seulement la production des usines d'assemblage et de fabrication de pièces, mais également celle des aciéries, des usines de caoutchouc et de verre, des fabricants de textiles et des producteurs d'énergie. Au sein de ce système entrent en jeu d'innombrables délais d'anticipation, de production, de livraison et de construction. Envisagez ensuite la relation entre la production automobile et

l'emploi – une hausse de la production accroît le nombre d'emplois, ce qui permet à davantage de gens d'acheter des voitures. Il s'agit d'une boucle amplificatrice, qui fonctionne aussi dans le sens inverse – baisse de la production, baisse de l'emploi, baisse des ventes de véhicules, baisse de la production. Ajoutez une autre boucle amplificatrice, à savoir que les spéculateurs achètent et vendent les actions des constructeurs automobiles et de leurs fournisseurs en fonction de leurs dernières performances, si bien qu'une hausse de la production entraîne une flambée des cotations en bourse, et inversement.

Ce vaste système – avec ses industries interdépendantes qui réagissent les unes par rapport aux autres selon des délais, s'influençant mutuellement dans leurs oscillations, lesquelles sont amplifiées par des effets multiplicateurs et spéculatifs – est la cause première des cycles économiques. Ces cycles ne sont pas générés par les chefs d'État, bien que ces derniers aient les moyens d'apaiser ou d'intensifier l'optimisme des périodes d'expansion et la souffrance des périodes de récession. Les économies sont des systèmes extrêmement complexes ; avec leurs multiples boucles de rétroaction régulatrices et leurs délais, elles sont intrinsèquement oscillatoires[5].

Systèmes à deux stocks

Un stock renouvelable limité par un stock non renouvelable – une économie pétrolière

Les systèmes que j'ai décrits jusqu'ici n'étaient soumis à aucune contrainte par leur environnement. Le stock de capital du modèle économique industriel n'avait pas besoin de matières premières pour produire des biens. La population n'avait pas besoin de nourriture. Le système de chauffage à thermostat ne se trouvait jamais à court de combustible. Ces modèles simples fonctionnaient selon leur dynamique interne en l'absence de toute contrainte afin que nous puissions observer ces dynamiques.

Cependant, toute entité physique réelle est nécessairement plongée dans un environnement avec lequel elle interagit. Une entreprise a besoin d'un apport constant d'énergie, de matières, d'employés, de cadres et de clients. Un champ de maïs a besoin d'eau, de nutriments et d'une protection contre les nuisibles. Une population a besoin de nourriture, d'eau et d'espace vital, et s'il s'agit d'êtres humains, elle a besoin d'emplois, d'éducation, de services de santé et d'une multitude d'autres choses. Toute entité qui consomme de l'énergie et transforme des matières a besoin d'un endroit pour stocker ses déchets ou d'un procédé pour les éliminer.

Par conséquent, tout système physique en expansion se heurte tôt ou tard à une contrainte ou une autre. Celle-ci prendra la forme d'une boucle régulatrice qui supplantera la prédominance de la boucle amplificatrice engendrant la croissance, soit en renforçant le flux sortant, soit en réduisant le flux entrant.

La croissance au sein d'un environnement contraint est très courante, à tel point que les penseurs systémiques qualifient cette situation d'archétype des « limites à la croissance ». (Au chapitre 5, nous aborderons d'autres archétypes – structures systémiques répandues qui induisent des schémas comportementaux familiers.) À chaque fois que nous observons une entité en expansion, que ce soit une population, une entreprise, un compte bancaire, une rumeur, une épidémie ou les ventes d'un nouveau produit, nous recherchons les boucles amplificatrices qui lui permettent de se développer et les bouches régulatrices qui finiront par la contraindre. Nous savons que ces dernières sont présentes, même si elles ne dominent pas encore le comportement du système, car aucun système physique réel ne peut croître éternellement. Fût-il sensationnel, un nouveau produit finira toujours par saturer le marché. La réaction en chaîne d'une centrale ou d'une bombe nucléaire se trouvera à un certain moment à court de combustible. Un virus finira par manquer d'hôtes sensibles. Une économie pourra être limitée par le capital physique, le capital financier, la main-d'œuvre, les marchés, le management, les ressources ou la pollution.

À l'instar des ressources qui alimentent les flux entrants d'un stock, une contrainte de pollution peut être renouvelable ou non.

Elle est non renouvelable si l'environnement est incapable d'absorber le polluant ou de le rendre inoffensif. En revanche, elle est renouvelable si l'environnement présente une capacité finie, généralement variable, à éliminer le polluant. Par conséquent, tout ce que nous disons ici au sujet des systèmes limités par les ressources s'applique avec la même dynamique, mais avec des flux inversés, aux systèmes limités par la pollution.

> **Un système physique qui s'accroît exponentiellement comporte au moins une boucle amplificatrice suscitant la croissance et au moins une boucle régulatrice limitant cette croissance, car aucun système physique ne peut croître éternellement dans un environnement fini.**

Les contraintes subies par un système en expansion peuvent être temporaires ou permanentes. Le système trouvera éventuellement un moyen de les éviter pendant un temps plus ou moins long. Mais il devra parvenir un jour ou l'autre à un compromis : soit le système s'adaptera à la contrainte, soit la contrainte au système, soit les deux à la fois. Cette adaptation impliquera certaines dynamiques intéressantes.

Le fait que les boucles régulatrices limitantes reposent sur une ressource renouvelable ou non aura une incidence non pas sur la poursuite d'une croissance infinie, mais sur la manière dont cette dernière prendra fin.

Observons tout d'abord un système capitaliste tirant ses profits de l'extraction d'une ressource non renouvelable, par exemple, une compagnie pétrolière qui vient de découvrir un énorme gisement.

Le schéma de la figure 37 pourra sembler complexe, mais ce n'est guère plus qu'un système de croissance capitaliste tel que nous l'avons vu précédemment, où l'on a remplacé la « production » par le « profit ». La dépréciation est générée par la boucle régulatrice qui nous est désormais familière : plus le stock de capital augmente, plus les machines et les raffineries sont nombreuses à s'user et à rendre l'âme, réduisant ainsi le stock. Dans cet exemple, le capital constitué

par les équipements de forage et de raffinage a une durée de vie de 20 ans – autrement dit, il perd chaque année un vingtième (ou 5 %) de sa valeur. Il s'accumule grâce au réinvestissement des profits tirés de l'extraction du pétrole. Nous voyons ainsi comment fonctionne la boucle amplificatrice : plus le capital augmente, plus il permet d'exploiter le gisement, plus les profits susceptibles d'être réinvestis sont importants. J'ai supposé que la compagnie avait un objectif de croissance annuelle de son capital d'exploitation de 5 %. Si ses profits sont insuffisants pour l'atteindre, l'entreprise investit le pourcentage qu'elle peut.

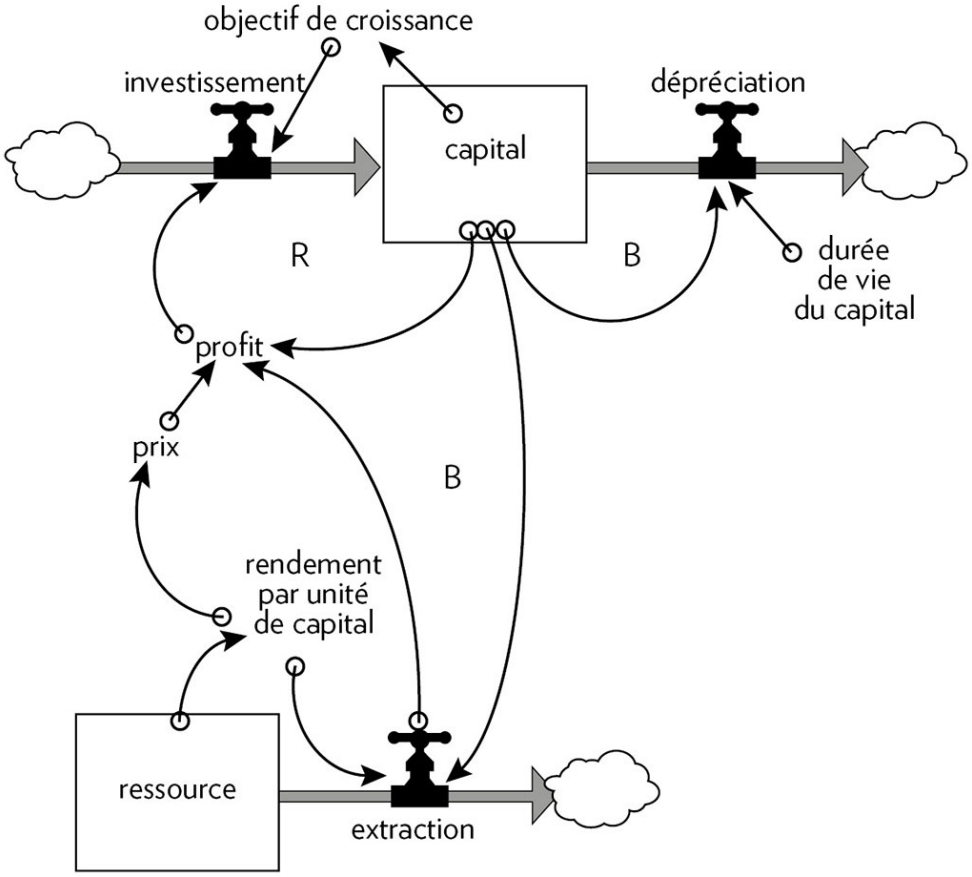


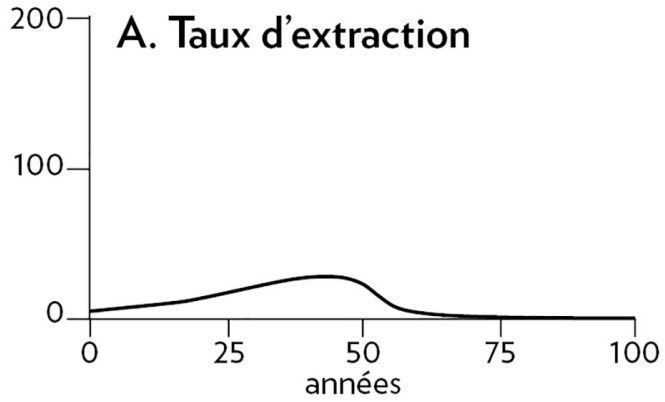
Figure 37. Capitaléconomique avec sa boucle amplificatrice de croissance limitée par une ressource non renouvelable.

Le profit équivaut au revenu diminué du coût. Sur cette représentation simplifiée, le revenu correspond au prix de vente du

pétrole multiplié par la quantité extraite par la compagnie. Le coût équivaut au capital multiplié par les charges d'exploitation (énergie, main-d'œuvre, matières, etc.) par unité de capital. Pour l'instant, je supposerai que le prix de vente et le coût d'exploitation par unité de capital sont constants.

En revanche, le rendement de la ressource par unité de capital n'est pas supposé constant. Le pétrole étant non renouvelable, le stock qui alimente le flux d'extraction est dépourvu d'intrant. Plus le puits est exploité, plus le baril suivant est difficile à obtenir. La ressource restante est enfouie plus profondément, ou plus diluée, ou sujette à une moindre pression la forçant à migrer vers la surface. Par conséquent, l'exploitation de la ressource devient de plus en plus coûteuse et techniquement complexe.

Cette nouvelle boucle de rétroaction régulatrice finira par contrôler la croissance du capital : plus le capital est important, plus l'extraction augmente, et plus le stock de ressource diminue. Plus la ressource s'épuise, plus son rendement par unité de capital diminue, et plus le profit (avec un prix supposé constant) et le taux d'investissement diminuent – et par conséquent, plus le taux de croissance du capital diminue. Je pourrais supposer que l'épuisement de la ressource se répercute sur les charges d'exploitation ainsi que sur l'efficacité du capital. Dans le monde réel, on observe les deux conséquences. Dans un cas comme dans l'autre, le système témoigne d'un mode de comportement similaire – la dynamique traditionnelle de l'épuisement (voir figure 38).



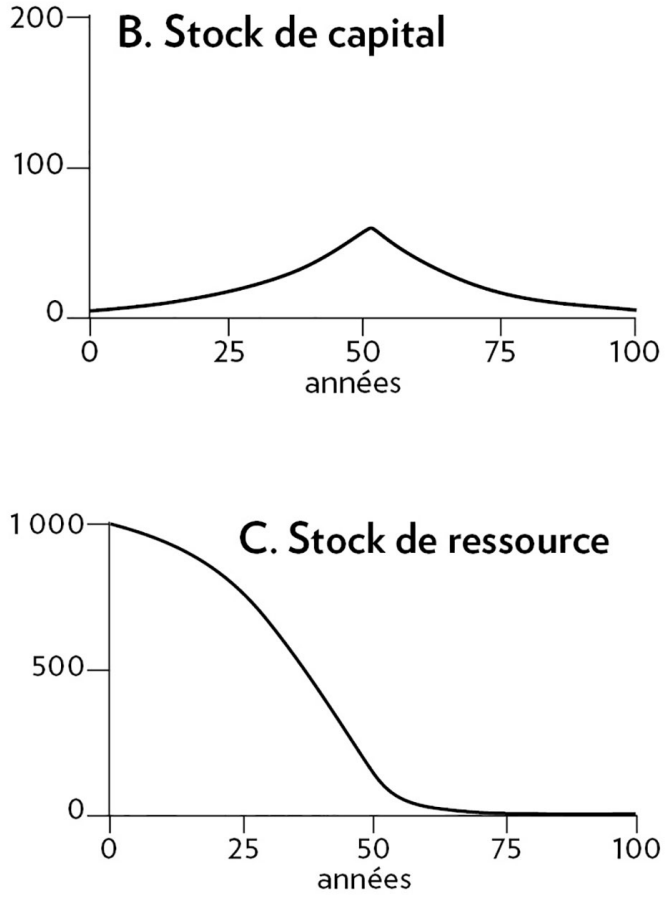


Figure 38. L'extraction (A) génère des profits qui alimentent la croissance du capital (B) tout en diminuant le stock de ressource non renouvelable (C). Plus l'accumulation de capital augmente, plus la ressource s'épuise rapidement.

Au départ, le gisement renferme suffisamment de pétrole pour être exploité durant 200 ans. Cependant, l'extraction atteint son point culminant au bout d'une quarantaine d'années du fait de sa croissance exponentielle inattendue. Avec un taux d'investissement de 10 % par an, le stock de capital et donc le rythme d'extraction augmentent de 5 % par an, si bien qu'ils doublent en l'espace de 14 ans. Au bout de 28 ans, le capital a quadruplé, et l'extraction commence à ralentir du fait de la baisse du rendement par unité de capital. Vers la cinquantième année, le coût de maintien du stock de capital dépasse les revenus de l'extraction de la ressource, si bien que les profits ne suffisent plus pour conserver des investissements supérieurs à la dépréciation. L'exploitation décroît rapidement à

mesure que le capital décline. Et la ressource restante, plus coûteuse, demeure dans le sol car il n'est plus rentable de l' extraire.

Que se passe-t-il si la ressource initiale s'avère deux fois plus importante que les géologues l'avaient pensé – voire quatre fois ? Bien sûr, cela fait une énorme différence quant au volume total de pétrole susceptible d'être extrait du gisement concerné. Néanmoins, avec le même objectif de réinvestissement de 10 % par an générant une croissance du capital de 5 %, chaque doublement de la ressource retarde d'environ 14 ans seulement le pic d'extraction, ainsi que la durée de vie des emplois ou des communautés dépendant de l'industrie d'extraction (voir figure 39).

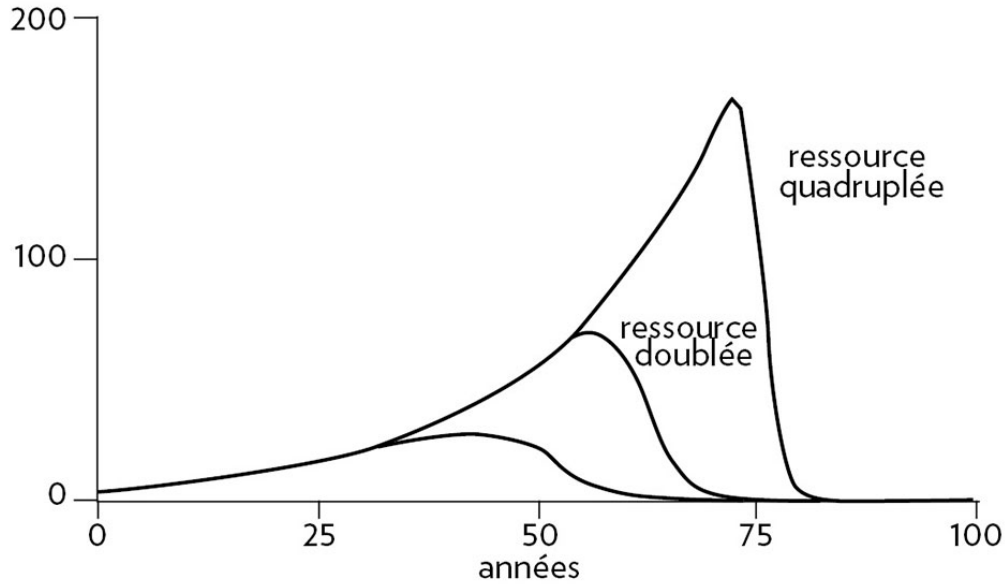


Figure 39. Évolution de l'extraction lorsque la ressource est deux fois ou quatre fois plus importante. Chaque doublement de la ressource ne retarde le pic d'extraction que d'environ 14 ans.

Lorsque vous accumulez un stock de capital reposant sur une ressource non renouvelable, plus votre croissance est importante et rapide, plus votre chute sera conséquente et rapide. Face à une croissance exponentielle de l'extraction ou de l'utilisation, le doublement ou le quadruplement d'une ressource non renouvelable

ne procure que peu de temps supplémentaire pour développer des solutions alternatives.

Si vous vous préoccupez avant tout d'extraire la ressource et de gagner de l'argent le plus rapidement possible, la taille du gisement est le paramètre le plus important de ce système. Si, par exemple, vous êtes ouvrier dans une mine ou un gisement de pétrole et que votre principal souci est la durée de vie de votre emploi et la stabilité de votre communauté, les deux paramètres cruciaux sont l'ampleur de la ressource et le taux désiré de croissance du capital. (Ce qui montre à quel point l'objectif d'une boucle de rétroaction influe sur le comportement d'un système.) Dans la gestion d'une ressource non renouvelable, le véritable choix consiste soit à s'enrichir très rapidement, soit à gagner moins mais plus longtemps.

> **Lorsqu'une quantité croît exponentiellement vers une contrainte ou limite, elle atteint cette dernière en un laps de temps étonnamment court.**

La figure 40 montre l'évolution du rythme d'extraction dans le temps pour différents taux de croissance souhaités, supérieurs à la dépréciation, allant de 1 % à 7 % par an. Si l'on vise un taux de croissance de 7 %, ce gisement exploitable « durant 200 ans » atteint son pic d'extraction au bout de 40 ans. Imaginez les conséquences de ce choix non seulement sur les profits de la compagnie, mais sur l'environnement social et naturel de la région.

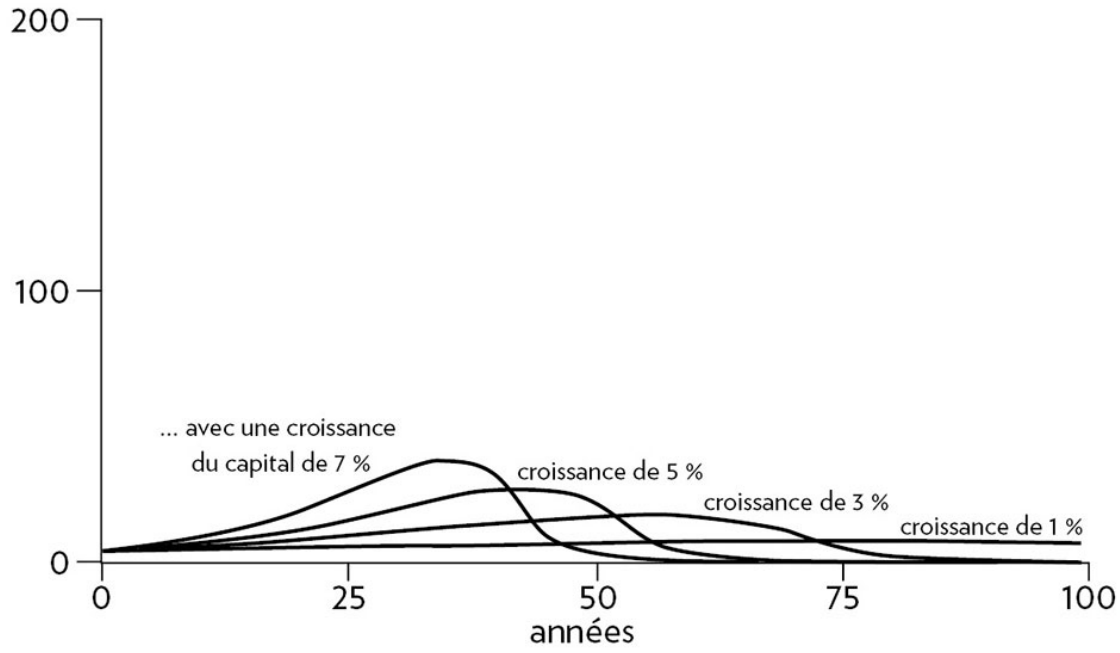


Figure 40. Plus la fraction de profits réinvestis augmente, plus le pic d'extraction survient rapidement.

Afin de simplifier mon propos, j'ai supposé plus haut que le prix de vente était constant. Mais si ce n'était pas le cas ? Imaginons qu'à court terme la ressource devienne si indispensable aux consommateurs qu'une hausse de prix ne réduise pas la demande. Dans ce cas, la ressource continue à se raréfier tandis que son prix monte en flèche, comme le montre la figure 41.

Le prix accru procure à l'industrie des profits plus importants, si bien que l'investissement s'accroît, le stock de capital poursuit sa hausse et la ressource restante plus coûteuse peut être extraite. En comparant la figure 41 avec la figure 38 où le prix reste constant, vous voyez que la hausse de prix a pour principal effet de faire grimper le capital plus haut avant qu'il ne s'effondre.

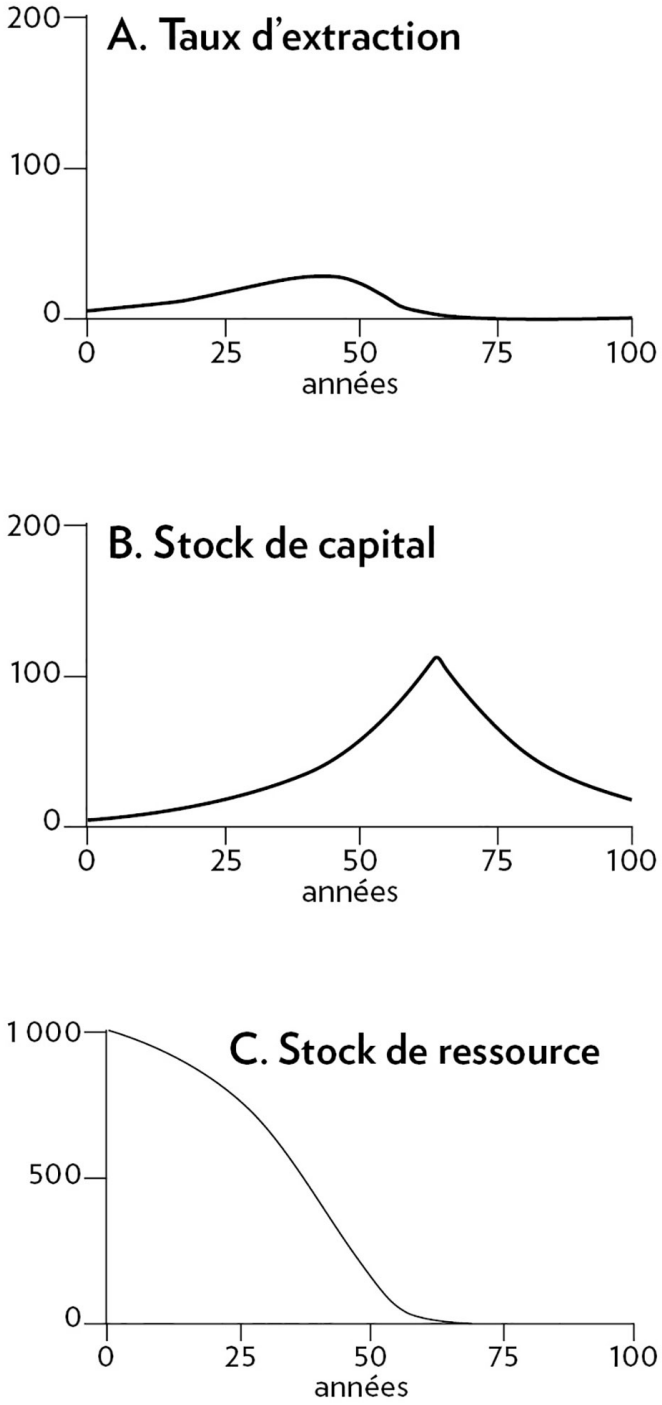


Figure 41. À mesure que le prix augmente du fait de la raréfaction de la ressource, la compagnie a davantage de profits à réinvestir, si bien que le stock de capital s'accroît (B) et l'extraction se poursuit plus longtemps (A). Par conséquent, la ressource s'épuise plus rapidement encore (C).

D'ailleurs, on observera le même comportement si les prix restent stables mais que les coûts d'exploitation diminuent grâce aux progrès technologiques – ce qui s'est produit par exemple avec les techniques avancées de récupération du pétrole, l'amélioration des procédés d'extraction de la taconite à moindre teneur en fer des gisements ferrifères épuisés, et la lixiviation au cyanure permettant une exploitation rentable des résidus miniers d'or et d'argent.

Nous avons tous conscience du fait qu'une mine, un gisement de pétrole ou une nappe phréatique puissent s'épuiser. Aux quatre coins du monde, des villes minières et des champs pétrolifères abandonnés témoignent de la réalité du comportement que nous venons de décrire. Les compagnies qui exploitent ces ressources connaissent également cette dynamique. Bien avant que l'épuisement des ressources ne rende leur capital moins efficace sur un site, ces entreprises orientent leurs investissements vers la prospection et l'exploration de nouveaux gisements. Mais si les ressources se révèlent parfois limitées localement, pourraient-elles également le devenir au niveau mondial ?

Je vous laisse y réfléchir et en discuter avec des partisans de la thèse opposée. Je signalerai juste qu'en vertu de la dynamique de l'épuisement, plus le stock de ressource initiale est important, plus les nouvelles explorations sont nombreuses, plus longtemps les boucles de croissance échappent aux boucles de régulation, plus le stock de capital s'accroît et le rythme d'extraction augmente, et plus le déclin économique sera précoce, rapide et considérable une fois le pic de production franchi.

À moins que l'économie n'apprenne à fonctionner exclusivement avec des ressources renouvelables.

Un stock renouvelable limité par un autre stock renouvelable – une économie de pêche

Nous allons réutiliser le système capitaliste de la section précédente en adjoignant un flux entrant au stock de ressource, de manière à rendre cette dernière renouvelable. Dans ce système, la ressource renouvelable pourra être le poisson et le stock de capital

les bateaux de pêche. Il pourra également s'agir de forêts et de scieries, ou de pâturages et de troupeaux. Les ressources renouvelables vivantes comme les poissons, les arbres ou l'herbe se régénèrent d'elles-mêmes *via* une boucle de rétroaction amplificatrice. En revanche, les ressources renouvelables non vivantes telles que la lumière du soleil, le vent ou l'eau d'une rivière se régénèrent grâce à un apport régulier qui alimente leur stock, quel que soit son niveau. Lors d'une épidémie de rhinopharyngite, nous avons affaire à un « système de ressource renouvelable » de structure identique. La maladie épargne ses victimes, qui peuvent ensuite contracter un nouveau rhume. Les ventes d'un produit que les gens doivent acheter régulièrement constituent aussi un système de ressource renouvelable ; le stock des clients potentiels se régénère sans fin. De même que l'infestation par des insectes détruisant une plante en partie seulement ; la plante se régénère et les insectes continuent à la manger. Dans tous ces cas, un apport renfloue continuellement le stock de ressources limitant (voir figure 42).

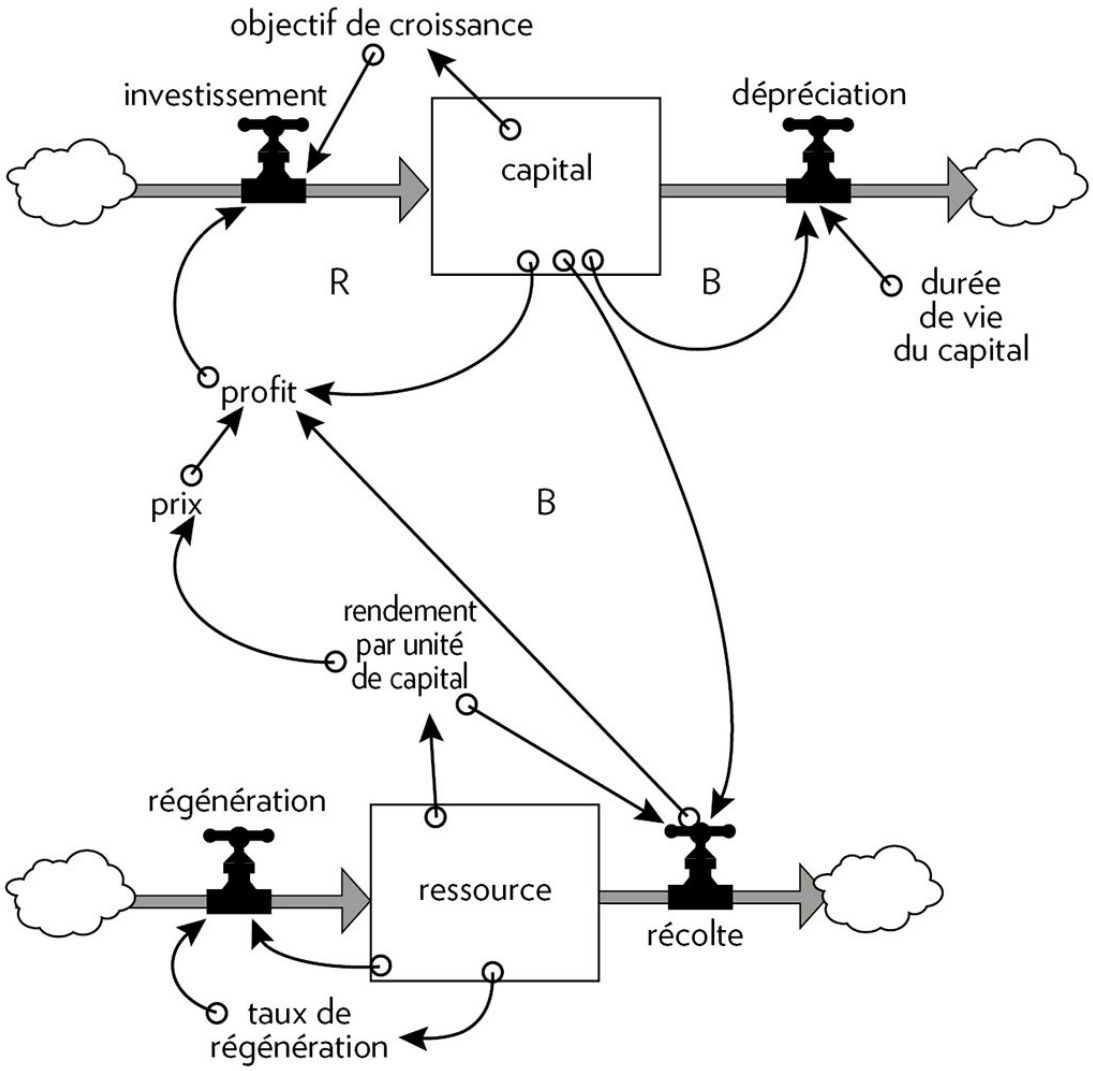


Figure 42. Capital économique avec sa boucle amplificatrice de croissance limitée par une ressource renouvelable.

Prenons l'exemple d'une pêcherie. Là encore, nous supposerons que le capital a une durée de vie de 20 ans et que l'entreprise vise une croissance de 5 % par an. Comme dans le cas d'une ressource non renouvelable, nous estimerons que plus le poisson est rare, plus il coûte cher à pêcher en termes de capital. Pour exploiter les derniers bancs, il faut des bateaux plus gros capables d'aller plus loin et pourvus de sonars ; ou des filets dérivants de plusieurs kilomètres de long ; ou encore des systèmes de réfrigération à bord

afin de conserver les prises lointaines jusqu'au retour au port. Tous ces équipements exigent davantage de capitaux.

Le taux de régénération de la ressource n'est pas constant, mais dépend du nombre de poissons dans la zone concernée – la densité de population. Si cette dernière est très dense, son taux de reproduction est proche de zéro du fait du manque de nourriture et d'habitat. Si la population diminue un peu, elle parviendra à se régénérer de plus en plus vite car elle bénéficiera des nutriments et de l'espace non utilisés de l'écosystème. Jusqu'à ce qu'elle atteigne son taux de reproduction maximal. Toutefois, si la population de poissons diminue beaucoup, elle se reproduira non pas de plus en plus vite, mais de plus en plus lentement. Soit parce que les poissons peinent à se rencontrer, soit parce qu'une autre espèce s'est installée. Ce modèle simplifié d'une économie de pêche est affecté par trois relations non linéaires : le prix (plus le poisson est rare, plus il est cher), le taux de régénération (la population se reproduit peu si elle est trop rare ou trop dense) et le rendement par unité de capital (efficacité des technologies et pratiques de pêche).

Un tel système peut susciter de nombreux types de comportements, dont celui qui est décrit à la figure 43. Dans ce cas, le capital et la prise de poisson augmentent exponentiellement dans un premier temps. La population pêchée (le stock de ressource) diminue, mais cela stimule son taux de reproduction. Puis le prélèvement devient trop important et la population de poissons atteint un niveau suffisamment bas pour réduire la rentabilité de la flotte de pêche. La rétroaction régulatrice de la diminution de la pêche réduisant les profits fait baisser le taux d'investissement assez rapidement pour ramener la flotte en équilibre avec la ressource de poisson. La flotte ne peut croître éternellement, mais elle peut maintenir indéfiniment un taux de pêche élevé et régulier.

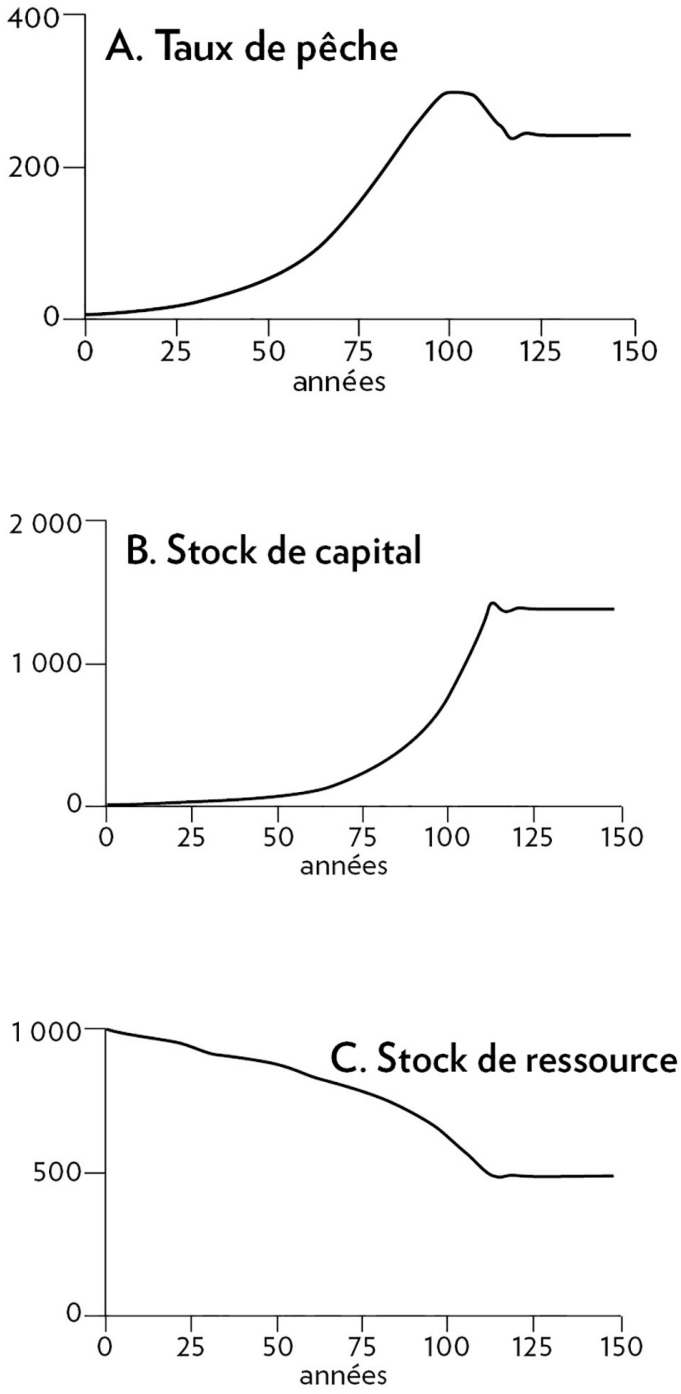
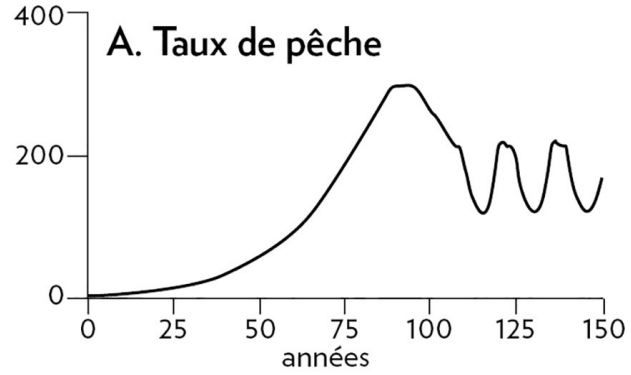
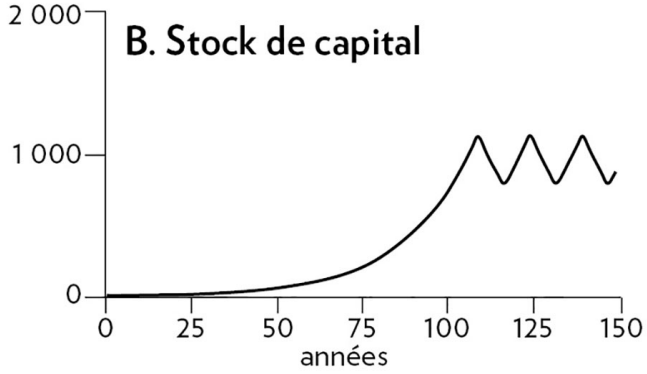


Figure 43. La pêche annuelle (A) génère des profits qui permettent au stock de capital de croître (B), puis elle finit par se stabiliser, après un léger rebond dans ce cas. Si bien que le stock de ressource (C) devient lui aussi constant.

Cependant, une légère modification de la force de la rétroaction régulatrice par le biais du rendement par unité de capital peut avoir des conséquences étonnantes. Supposons qu'afin d'accroître les récoltes, l'industrie propose une nouvelle technologie améliorant l'efficacité des bateaux (par exemple un sonar pour détecter les poissons qui se raréfient). À mesure que la population de poissons décline, la capacité de la flotte à ramener des prises identiques par bateau ne perdure qu'un peu plus longtemps (voir figure 44).

La figure 44 illustre un nouvel exemple du phénomène « gros effet de levier, mauvaise direction » ! En accroissant la productivité de tous les pêcheurs, cette évolution technologique entraîne l'instabilité du système. Des oscillations surviennent !





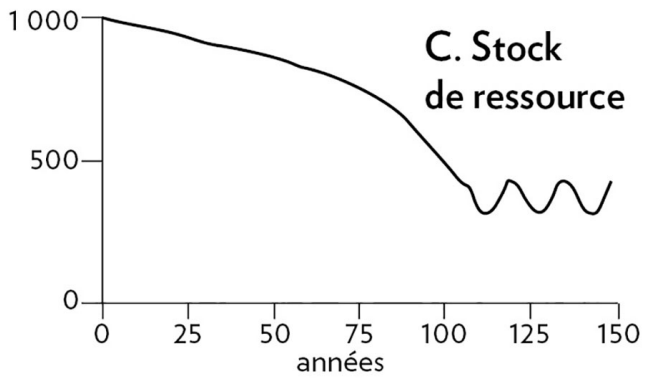
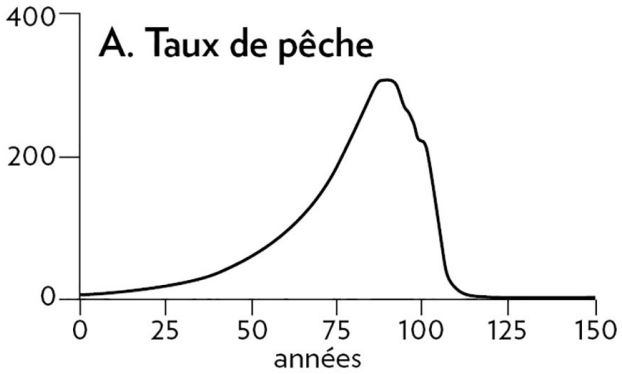


Figure 44. Une légère augmentation du rendement par unité de capital – ici grâce à une innovation technologique – entraîne une oscillation autour d'une valeur stable du rythme de pêche (A), du capital économique du stock (B) et du stock de ressource (C).

Et si les technologies halieutiques progressent encore, les navires de pêche poursuivront leur exploitation même si les poissons atteignent des densités de population très basses. Il pourra en résulter un anéantissement total des poissons et de l'industrie de la pêche. Ce qui entraînerait la désertification du milieu marin. Autrement dit, le poisson deviendrait une ressource non renouvelable. La figure 45 illustre ce scénario.



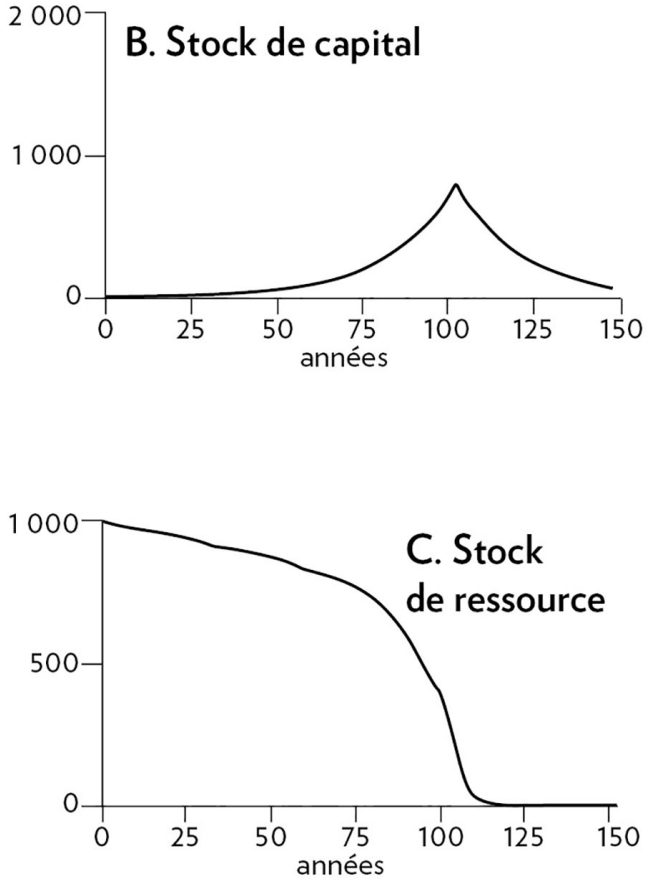


Figure 45. Une augmentation accrue du rendement par unité de capital provoque un dépassement suivi de l'effondrement du taux de pêche (A), du capital économique (B) et de la ressource (C).

Dans bon nombre d'économies reposant sur de véritables ressources renouvelables – contrairement à ce modèle simplifié –, la très faible population ayant survécu conserve la possibilité de se régénérer après la disparition du capital qui régissait son exploitation. Tout le processus se répète alors quelques décennies plus tard. De tels cycles de ressource renouvelable à très long terme ont déjà été observés, par exemple dans l'industrie forestière de la Nouvelle-Angleterre qui connaît aujourd'hui son troisième cycle de croissance, surexploitation, effondrement et régénération. Mais cela ne fonctionne pas pour toutes les populations de ressource. De plus en plus, du fait de leur efficacité croissante, les technologies d'exploitation ont la capacité de réduire certaines populations jusqu'à l'extinction.

> **Une ressource non renouvelable est limitée par son *stock*.**
> La totalité du stock est disponible immédiatement, et peut être extraite au rythme souhaité (principalement limité par le capital d'exploitation). Mais puisque le stock n'est pas renouvelé, plus l'extraction est rapide, plus la durée de vie de la ressource est courte.

Dans le monde réel, la survie d'un système de ressource renouvelable à la surexploitation dépend de ce qui se passera quand son stock sera au plus bas. Une population de poissons réduite à la portion congrue sera particulièrement vulnérable à la pollution, aux tempêtes ou au manque de diversité génétique. Dans le cas de forêts ou de prairies, les sols seront extrêmement sensibles à l'érosion. Ou bien la niche écologique quasi désertée sera reprise par une espèce concurrente. Ou alors la ressource épuisée survivra et se reconstituera.

> **Une ressource renouvelable est limitée par un *flux*.**
> Elle peut supporter d'être exploitée indéfiniment, mais uniquement selon un flux déterminé équivalant au rythme auquel elle se régénère. Si elle est extraite ou récoltée plus vite qu'elle ne se régénère, elle risque de descendre en dessous d'un seuil critique et de devenir de fait une ressource non renouvelable.

Je viens de décrire trois comportements possibles de ce système de ressource renouvelable :

- dépassement suivi d'une stabilisation à un équilibre durable ;
- dépassement au-delà de cet équilibre, suivi d'une oscillation autour de ce niveau ;
- dépassement suivi d'un effondrement de la ressource et de l'industrie qui en dépend.

Le fait que l'un survienne plutôt qu'un autre dépend de deux choses : d'une part du seuil critique au-delà duquel la population

devient incapable de se régénérer ; d'autre part de la rapidité et de l'efficacité avec laquelle la boucle de rétroaction régulatrice freine la croissance du capital lorsque la ressource commence à s'épuiser. Si la rétroaction fait cesser la croissance avant que le seuil critique ne soit atteint, l'ensemble du système parviendra doucement à l'équilibre. Si la rétroaction est plus lente et moins efficace, le système se mettra à osciller. Et si la rétroaction est insuffisante, le capital continuera à croître tandis que la ressource tombera sous son seuil de capacité à se régénérer, entraînant l'effondrement de la ressource et de l'industrie.

Qu'elles soient renouvelables ou non, les limites à la croissance interdisent à un stock physique d'augmenter sans fin. Toutefois, la dynamique des contraintes est très différente dans les deux cas, ce qui s'explique par la distinction entre stock et flux.

Comme toujours en matière de comportement des systèmes complexes, le secret consiste à repérer quelles structures ont en germe quels comportements, et quelles conditions entraînent quels comportements – et lorsque c'est possible, à modifier les structures et les conditions afin de réduire les risques de comportements destructeurs et de favoriser les comportements bénéfiques.

DEUXIÈME PARTIE

LES SYSTÈMES ET NOUS

3.
Pourquoi les systèmes fonctionnent si bien

> « Si la mécanique de la terre est bonne dans son ensemble, alors chacune de ses pièces l'est également, que nous la comprenions ou pas. Si le biote, au fil des millénaires, a construit une chose que nous aimons mais ne comprenons pas, alors qui d'autre qu'un imbécile se débarrasserait des pièces apparemment inutiles ? Conserver le moindre engrenage est la première précaution d'un remaniement intelligent. »
> *Aldo Leopold, forestier*[1]

Au chapitre 2, nous avons présenté des systèmes simples générant un comportement qui leur est propre en fonction de leur structure. Certains sont des plus élégants. Survivant aux bouleversements du monde, ils retrouvent leur contenance dans certaines limites et reprennent leur tâche – maintenir la température d'une pièce, exploiter un gisement de pétrole ou adapter la taille d'une flotte de pêche à la productivité d'une ressource halieutique.

Si on le pousse dans ses retranchements, un système risque de s'effondrer ou d'adopter un comportement inédit. Mais globalement, les systèmes se débrouillent très bien. Telle est leur beauté : ils sont capables de bien fonctionner. Lorsque c'est le cas, nous percevons une sorte d'harmonie dans leur fonctionnement. Pensez par exemple à une communauté dont l'organisation tourne à plein régime pour affronter une tempête. Ses membres passent de longues heures à

venir en aide aux victimes, les talents et compétences émergent. Une fois l'urgence terminée, la vie revient à la « normale ».

Pourquoi les systèmes fonctionnent-ils aussi bien ? Réfléchissez aux propriétés des systèmes hautement efficaces – machines, communautés humaines ou écosystèmes – qui vous sont familiers. Vous repérerez sans doute l'une de ces trois caractéristiques : la résilience, l'auto-organisation ou la hiérarchie.

La résilience

> « Placer un système dans le carcan de la constance peut favoriser sa fragilité. »
> *C. S. Holling, écologue*[2]

La **résilience** fait l'objet de diverses définitions selon qu'elles émanent des domaines de l'ingénierie, de l'écologie ou de la systémique. Nous nous contenterons ici de celle du dictionnaire général : « Capacité à rebondir ou reprendre sa forme, sa position, etc., après avoir été pressé ou étiré. Élasticité. Capacité à recouvrer rapidement sa force, son entrain, sa bonne humeur ou toute autre qualité. » La résilience mesure la capacité d'un système à survivre et à perdurer dans un environnement changeant. Son contraire est la fragilité ou la rigidité.

La résilience naît d'une structure riche en boucles de rétroaction qui peuvent intervenir de diverses manières pour rétablir un système, même après une perturbation majeure. Une simple boucle régulatrice est capable de ramener le stock d'un système à l'état désiré. La résilience est fournie par plusieurs boucles de ce type qui agissent par le biais de différents mécanismes, à différentes échelles temporelles et avec une certaine redondance – une boucle prenant le relais lorsqu'une autre faillit.

Un ensemble de boucles capable de *rétablir ou reconstruire ses rétro-actions* offre une résilience d'un niveau supérieur – une méta-résilience en quelque sorte. Un cran au-dessus, une méta-méta-

résilience résulte de boucles de rétroaction capables *d'apprendre, de créer, de concevoir et de faire évoluer* des structures restauratrices encore plus complexes. Le système fait alors preuve d'auto-organisation – autre caractéristique étonnante que j'aborderai ensuite.

Le corps humain offre un formidable exemple de système résilient.Il est capable de repousser des milliers d'envahisseurs de toutes sortes, de supporter de grandes variations de température et d'apport nutritif, de redistribuer son irrigation sanguine, de réparer ses blessures, d'accélérer ou de ralentir son métabolisme et de compenser dans une certaine mesure l'absence ou la défaillance de certaines de ses parties. Ajoutez-y une intelligence auto-organisatrice qui est capable d'apprendre, d'entretenir des relations sociales, de concevoir des technologies et même de transplanter certains organes du corps, et vous obtenez un système extraordinairement résilient – mais pas à l'infini car, du moins pour l'instant, aucun corps humain doué d'intelligence n'a été assez résilient pour s'éviter, à lui ou tout autre corps, de finir par mourir.

> **Il y a toujours des limites à la résilience.**

Les écosystèmes témoignent eux aussi d'une remarquable résilience avec leurs multiples espèces qui se contrôlent mutuellement, se déplacent, se multiplient ou déclinent en réaction aux variations météorologiques, à la disponibilité des nutriments et aux impacts des activités humaines. De plus, populations et écosystèmes ont la capacité d'« apprendre » et d'évoluer par le biais d'une variabilité génétique d'une incroyable richesse. Si on leur laisse suffisamment de temps, ils peuvent générer des systèmes entièrement nouveaux pour tirer parti des conditions changeantes du maintien de la vie.

La résilience ne consiste pas nécessairement à être statique ou constant au fil du temps. Les systèmes résilients peuvent être des plus dynamiques. Les oscillations à court terme, les explosions périodiques ou les longs cycles de succession – climax et effondrement – sont parfois la condition normale, que la résilience contribue à restaurer !

À l'inverse, les systèmes qui sont constants au fil du temps peuvent se révéler non résilients. Cette distinction entre stabilité statique et résilience a son importance. La stabilité statique est un phénomène que vous pouvez observer ; elle se mesure par la variation de l'état d'un système de semaine en semaine, ou d'année en année. En revanche, la résilience d'un système peut être très difficile à percevoir à moins d'outrepasser ses limites, de déborder et d'endommager ses boucles de rétroaction jusqu'à l'effondrement de sa structure. La résilience n'étant pas toujours flagrante si l'on omet d'envisager le système dans son ensemble, les gens la sacrifient souvent à la stabilité, à la productivité ou à toute autre propriété immédiatement reconnaissable du système :

• L'injection d'hormones de croissance bovine génétiquement modifiées accroît la production de lait d'une vache sans nécessiter une augmentation proportionnelle de l'alimentation de l'animal. L'hormone détourne une partie de l'énergie métabolique d'autres fonctions biologiques au profit de la lactation. (On faisait sensiblement la même chose en matière de sélection des bovins depuis des siècles, mais à un degré moindre.) Le coût de l'accroissement de la production est la baisse de la résilience. La vache est en moins bonne santé, vit moins longtemps et dépend davantage de la gestion humaine.

• La livraison en flux tendu des produits aux détaillants ou des pièces aux fabricants a réduit l'instabilité des stocks et diminué les coûts dans de nombreux secteurs. Cependant, le modèle du flux tendu a aussi rendu le système productif plus vulnérable aux perturbations de l'approvisionnement en combustible, au trafic, aux pannes informatiques, au défaut de main-d'œuvre et autres pépins éventuels.

• En Europe, des siècles de gestion forestière intensive ont progressivement remplacé les écosystèmes d'origine par des plantations d'espèces uniques, du même âge et souvent allogènes. Ces exploitations ont été conçues pour produire du bois et de la pâte à papier rapidement et indéfiniment. Toutefois, en l'absence d'une diversité d'espèces qui auraient interagi entre elles – tirant du sol et y retournant différentes combinaisons de nutriments –, ces forêts ont

perdu leur résilience. Elles semblent particulièrement vulnérables à une nouvelle forme d'agression : la pollution industrielle de l'air.

De nombreuses maladies chroniques telles que le cancer et les troubles cardiaques résultent de l'effondrement des mécanismes de résilience qui réparent l'ADN, maintiennent la souplesse des vaisseaux sanguins ou contrôlent la division cellulaire. Dans bien des cas, les désastres écologiques proviennent d'une perte de résilience lorsque des espèces sont supprimées d'un écosystème, que la chimie et la biologie du sol sont perturbées, ou que des substances toxiques s'accumulent. De grandes organisations de toutes sortes, depuis les entreprises jusqu'aux gouvernements, perdent leur résilience du simple fait que les mécanismes de rétroaction, grâce auxquels elles sont sensibles à leur environnement et y réagissent, passent par de trop nombreuses strates de temporisation et de distorsion. (Nous y reviendrons dans un instant à propos des hiérarchies.)

> **Un système ne doit pas être géré uniquement au regard de sa productivité ou de sa stabilité, mais en recherchant également sa résilience** – capacité à se remettre d'une perturbation, aptitude à se rétablir ou à se réparer.

J'envisage la résilience comme un plateau sur lequel le système a la possibilité de jouer, exerçant ses fonctions normales en toute sécurité. Un système résilient dispose d'un grand plateau, un vaste espace au sein duquel il peut errer, avec des murs élastiques et souples qui lui permettront de rebondir s'il approche un bord dangereux. À mesure qu'un système perd en résilience, son plateau se rétrécit et ses murs protecteurs deviennent de plus en plus bas et rigides, jusqu'à ce que le système fonctionne sur le fil du rasoir en risquant à chaque mouvement de tomber d'un côté ou de l'autre. La perte de résilience peut arriver par surprise, car le système prête généralement beaucoup plus d'attention à son jeu qu'à son espace de jeu. Un jour, il fait une chose qu'il a déjà faite des centaines de fois auparavant, et il s'effondre.

Avoir conscience de la résilience permet d'envisager de nombreuses manières de préserver ou de renforcer les pouvoirs de restauration d'un système. Cette prise de conscience incite à conserver les écosystèmes naturels en agriculture, afin que les prédateurs participent davantage au contrôle des nuisibles. Elle sous-tend la santé « holistique » qui s'efforce non seulement de soigner la maladie mais de développer la résistance interne du corps. Elle sous-tend également les programmes d'aide qui, au lieu de se contenter de donner de la nourriture ou de l'argent, s'évertuent à changer les conditions qui empêchent les gens de se procurer eux-mêmes ce dont ils ont besoin.

L'auto-organisation

> « [L'évolution] ne nous apparaît plus comme une série d'accidents, déterminés par les changements apportés au milieu au cours de l'histoire de la Terre et par la concurrence vitale résultante, [mais] elle est gouvernée par des lois définies dont la découverte constitue, croyons-nous, l'une des tâches capitales assignées à la théorie évolutionniste de demain. »
> *Ludwig von Bertalanffy, biologiste*[3]

La caractéristique la plus merveilleuse de certains systèmes complexes réside dans leur aptitude à apprendre, à se diversifier, à se complexifier et à évoluer. C'est la capacité d'un seul ovule fécondé à générer à partir de lui-même l'incroyable complexité d'une grenouille mature, d'un poussin ou d'un être humain. C'est la capacité qu'a eue la nature à générer des millions d'espèces formidables à partir d'une flaque de substances chimiques organiques. C'est la capacité d'une société à développer les idées consistant à brûler du charbon, à produire de la vapeur, à pomper de l'eau et à spécialiser le travail pour finalement construire une usine

automobile, une ville de gratte-ciel, un réseau mondial de communications.

Cette capacité qu'ont les systèmes à rendre leur propre structure plus complexe est qualifiée d'**auto-organisation**. Vous la percevez à petite échelle de façon mécaniste lorsque vous observez un flocon de neige, des cristaux de givre sur une fenêtre mal isolée, ou une solution sursaturée donnant soudain naissance à un jardin de cristaux. L'auto-organisation se manifeste de façon plus profonde à chaque fois qu'une graine germe, qu'un bébé apprend à parler ou qu'un quartier décide de se rassembler pour s'opposer à l'implantation d'une décharge de déchets toxiques.

L'auto-organisation est une propriété si courante, en particulier dans les systèmes vivants, que nous la considérons comme normale. Sinon nous serions subjugués par les systèmes à l'œuvre dans notre monde. Si nous n'y étions pas quasiment aveugles, nous favoriserions davantage, au lieu de les détruire, les facultés d'auto-organisation des systèmes dont nous faisons partie.

À l'instar de la résilience, l'auto-organisation est souvent sacrifiée à la productivité à court terme et à la stabilité. Productivité et stabilité sont les justifications habituelles pour transformer les êtres humains créatifs en auxiliaires mécaniques des processus de production. Ou pour réduire la variabilité génétique des plantes cultivées. Ou pour instaurer des bureaucraties et des théories de la connaissance qui traitent les gens comme des numéros.

L'auto-organisation engendre l'hétérogénéité et l'imprévisibilité. Elle est susceptible de faire apparaître de toutes nouvelles structures, de toutes nouvelles manières de faire. Elle repose sur la liberté et l'expérimentation, ainsi que sur un certain désordre. Or ces conditions favorables à l'auto-organisation font souvent peur aux individus et aux structures du pouvoir. Par conséquent, les systèmes éducatifs ont tendance à réprimer la puissance créatrice des enfants au lieu de la stimuler. Les politiques économiques tendent davantage à soutenir les grosses entreprises établies que les petites nouvelles. Et de nombreux gouvernements préfèrent que leur population ne soit pas trop auto-organisatrice.

Fort heureusement, l'auto-organisation est une propriété si fondamentale des systèmes vivants que les structures de pouvoir les plus dominatrices ne pourront jamais l'anéantir. Cependant, il arrive que, sous couvert d'ordre public, elle soit étouffée durant de longues périodes stériles, mornes et cruelles.

Autrefois, les théoriciens des systèmes considéraient que l'auto-organisation était une propriété si complexe qu'on ne parviendrait jamais à la comprendre. Les ordinateurs ont été utilisés pour modéliser des systèmes mécanistes « déterministes », et non évolutionnistes, parce qu'on avait décidé sans trop y réfléchir que les systèmes évolutifs étaient tout bonnement impossibles à comprendre.

Néanmoins, de nouvelles découvertes suggèrent qu'un petit nombre de principes organisateurs simples peuvent mener à des structures auto-organisatrices extrêmement diversifiées. Imaginez un triangle dont les trois côtés sont de même longueur. Accolez au milieu de chaque côté un autre triangle équilatéral trois fois plus petit. Ajoutez aux deux côtés non accolés de ces nouveaux triangles un autre triangle trois fois inférieur aux précédents. Et ainsi de suite. Vous obtiendrez ce qu'on appelle un flocon de Koch (voir figure 46). Bien que son contour puisse atteindre une longueur extraordinaire, il reste inscrit dans un cercle. Cette structure offre un exemple simple de géométrie fractale – domaine des mathématiques et de l'art peuplé de formes sophistiquées qui sont générées par des règles relativement simples.

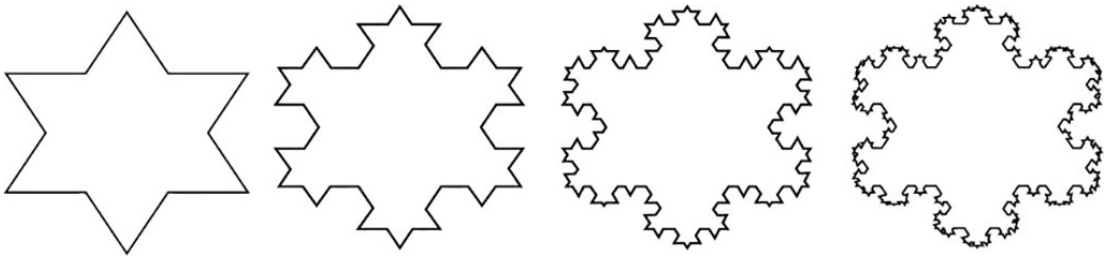


Figure 46. Un motif aussi complexe et délicat que ce flocon de Koch peut résulter d'une évolution fondée sur un ensemble élémentaire de principes organisateurs ou de règles.

De même, la splendide structure complexe et délicate d'une fougère stylisée peut être générée par ordinateur à l'aide de quelques règles fractales élémentaires. La différenciation qui transforme une unique cellule en une créature humaine repose sans doute sur un ensemble comparable de règles géométriques simples qui engendre cependant une extrême complexité. (C'est grâce à la géométrie fractale que la surface d'un poumon humain moyen équivaut à celle d'un court de tennis.)

Voici encore quelques exemples de règles simples qui ont abouti à des systèmes auto-organisateurs d'une grande complexité :

• Tout le vivant, depuis les virus et les amibes jusqu'aux séquoias et aux éléphants, repose sur les règles organisatrices élémentaires de la chimie de l'ADN, de l'ARN et des protéines ;

• La révolution agricole et tout ce qui a suivi a résulté de l'idée simple et subversive selon laquelle les hommes pouvaient s'installer à un endroit, posséder de la terre, sélectionner des plantes et les cultiver ;

• « Dieu a créé l'univers avec la Terre en son centre, la seigneurie avec un château en son centre, et l'humanité avec l'Église en son centre » – principe organisateur des structures sociales et physiques complexes de l'Europe du Moyen Âge ;

• « Dieu et la morale sont des idées dépassées ; les hommes doivent être objectifs et scientifiques, posséder et multiplier les moyens de production, et traiter les gens et la nature comme des intrants pour la production » – principes organisateurs de la révolution industrielle.

À partir de règles basiques d'auto-organisation peuvent se développer d'énormes cristaux de technologie, de structures physiques, d'organisations et de cultures les plus diversifiés.

Désormais, la science sait que des systèmes auto-organisateurs peuvent résulter de règles simples. Étant elle-même un système auto-organisateur, elle aime à penser qu'en définitive, toute la complexité du monde doit découler de règles élémentaires. En revanche, elle ignore encore si cela se produira véritablement.

> **Un système détient souvent la propriété d'auto-organisation – l'aptitude à se structurer, à créer de nouvelles structures, à apprendre, à se diversifier et à se complexifier.** Des formes d'auto-organisation même complexes peuvent découler – ou pas – de règles d'organisation relativement simples.

La hiérarchie

« Comme l'ont observé les naturalistes,
Une puce est la proie de puces plus petites ;
Lesquelles sont piquées par de plus petites encore,
Et ainsi de suite *ad infinitum*. »
Jonathan Swift, poète du XVIII^e^ siècle[4]

En créant de nouvelles structures et en gagnant en complexité, un système auto-organisateur génère souvent une **hiérarchie**.

Le monde, ou du moins ses parties que les humains pensent connaître, est organisé en sous-systèmes qui s'agrègent en sous-systèmes plus importants, lesquels s'agrègent en sous-systèmes plus grands encore. Une cellule de votre foie est un sous-système d'un organe viscéral, qui est un sous-système de vous-même en tant qu'organisme vivant, tandis que vous êtes un sous-système d'une famille, d'une équipe d'athlétisme, d'un orchestre, etc. Ces derniers groupes sont des sous-systèmes d'une ville, puis d'une nation, puis de l'ensemble du système socio-économique mondial qui fait partie de la biosphère. Cet agencement de systèmes et de sous-systèmes est qualifié de hiérarchie.

Les entreprises, les organisations militaires, les écosystèmes, les systèmes économiques, les organismes vivants sont ordonnés selon une hiérarchie. Et ce n'est pas un hasard. Lorsque les sous-systèmes parviennent en grande partie à prendre soin d'eux-mêmes, à se réguler et à se maintenir tout en répondant aux besoins du système

plus important, et que ce dernier coordonne et améliore le fonctionnement des sous-systèmes, il en résulte une structure stable, résiliente et efficace. On imagine difficilement comment un autre type d'agencement aurait pu advenir.

INTERLUDE

Pourquoi l'univers est organisé en hiérarchies : une parabole

Il était une fois deux horlogers prénommés Hora et Tempus. Tous deux fabriquaient d'excellentes montres, et tous deux avaient de nombreux clients. Les chalands passaient régulièrement dans leurs boutiques, et leurs téléphones sonnaient constamment pour de nouvelles commandes. Cependant, au fil des ans, Hora prospéra, tandis que Tempus devint de plus en plus pauvre. En effet, Hora avait découvert le principe de la hiérarchie…

Les montres des deux artisans consistaient chacune en un millier de pièces environ. Tempus assemblait les siennes de telle sorte que s'il s'interrompait – par exemple pour répondre au téléphone –, l'ensemble se démontait. Lorsqu'il se remettait au travail, il devait tout reprendre à zéro. Plus les clients appelaient, plus il avait de mal à trouver des plages suffisantes pour terminer une montre sans être interrompu.

Les montres d'Hora n'étaient pas moins complexes que celles de son confrère, mais il réalisait des sous-montages stables d'une dizaine de pièces. Puis il assemblait dix sous-montages en un montage plus important ; et dix montages ainsi obtenus constituaient une montre entière. Lorsque Hora devait lâcher une montre en cours d'assemblage pour répondre au téléphone, il ne perdait qu'une petite partie de son travail. Si bien qu'il fabriquait ses montres de façon beaucoup plus rapide et efficace que Tempus.

Un système complexe ne peut se développer à partir de systèmes simples que s'il existe des formes intermédiaires stables. Ainsi la forme complexe qui en résulte est-elle hiérarchisée. Cela pourrait expliquer pourquoi les hiérarchies

> sont si courantes dans les systèmes que nous rencontrons dans la nature. Parmi toutes les formes complexes possibles, celles dotées d'une hiérarchie sont les seules qui ont eu le temps d'évoluer[5].

La hiérarchie est une invention systémique géniale, non seulement parce qu'elle confère stabilité et résilience au système, mais parce qu'elle réduit la quantité d'informations dont toute partie du système doit garder la trace.

Dans un système hiérarchique, les relations *au sein* de chaque sous-système sont plus denses et plus fortes que les relations *entre* les sous-systèmes. Chaque élément reste connecté à tous les autres, mais pas aussi fortement. Les membres d'un département universitaire parlent davantage entre eux qu'avec les membres des autres départements. Les cellules qui constituent le foie communiquent davantage entre elles qu'avec les cellules du cœur. Quand ces liens de communication différenciés au sein de chaque niveau hiérarchique et entre eux sont bien conçus, les délais de rétroaction sont minimisés. Aucun niveau n'est surchargé d'informations. Le système fonctionne avec efficacité et résilience.

Un système hiérarchique est partiellement décomposable. En cas de démantèlement, ses sous-systèmes et leurs liens de communication particulièrement denses peuvent fonctionner, au moins en partie, en tant que systèmes à part entière. Lorsqu'une hiérarchie s'effondre, elle se fragmente en général suivant les frontières des sous-systèmes. Nous avons beaucoup à apprendre à diviser un système selon différents niveaux hiérarchiques – cellules et organes, par exemple – et à les étudier séparément. Ainsi les penseurs systémiques diront-ils que la dissection réductionniste de la science conventionnelle est très instructive. Toutefois, nous ne devons pas perdre de vue les relations importantes qu'entretient chaque sous-système avec les autres ainsi qu'avec les niveaux supérieurs de la hiérarchie, sous peine de surprises.

Si vous souffrez du foie par exemple, le médecin vous soignera généralement sans prêter grande attention à votre cœur ou à vos amygdales (pour rester au même niveau hiérarchique), à votre

personnalité (pour monter d'un ou deux niveaux) ou à l'ADN nucléaire de vos cellules hépatiques (pour descendre de plusieurs niveaux). Il y a néanmoins suffisamment d'exceptions à cette règle qui renforcent la nécessité de prendre du recul afin d'appréhender l'ensemble de la hiérarchie. Il se pourrait que votre profession vous expose à une substance chimique qui endommage votre foie. Ou que votre pathologie résulte d'une anomalie de l'ADN.

En outre, les paramètres auxquels vous devez penser sont susceptibles de changer au fil du temps car les systèmes auto-organisateurs développent de nouveaux degrés de hiérarchie et d'intégration. Autrefois les systèmes énergétiques des nations étaient quasiment indépendants les uns des autres. Ce n'est plus le cas. Les gens dont la pensée n'a pas évolué aussi vite que l'économie de l'énergie seront sans doute choqués de découvrir à quel point ils dépendent désormais de ressources et de décisions venant de l'autre bout du monde.

Observez comment les systèmes auto-organisateurs instaurent des hiérarchies. Un travailleur indépendant qui a trop de commandes finira par embaucher des collaborateurs. Une petite organisation à but non lucratif qui attire de plus en plus de membres et dont le budget prend de l'ampleur décidera un jour ou l'autre de recruter quelqu'un pour gérer tout cela. Un groupe de cellules qui prolifèrent se différencieront en fonctions spécifiques et génèreront un système circulatoire pour alimenter toutes les cellules ainsi qu'un système nerveux pour les coordonner.

Une hiérarchie évolue du bas vers le haut – de la pièce à l'ensemble, de la cellule à l'organe ou l'organisme, de l'individu à l'équipe, de la production matérielle à la gestion de la production. Les premiers agriculteurs ont décidé de se regrouper et de former des villes pour se protéger et commercer plus efficacement. La vie est née de bactéries unicellulaires et non d'un éléphant. L'objectif initial d'une hiérarchie est toujours de permettre à ses sous-systèmes de mieux faire leur travail. C'est malheureusement une chose que les niveaux supérieurs et inférieurs d'une hiérarchie complexe ont tendance à oublier. Si bien que de nombreux systèmes peinent à atteindre leurs objectifs du fait d'une hiérarchie dysfonctionnelle.

Lorsqu'un membre d'une équipe s'intéresse davantage à sa gloire personnelle qu'à la victoire de l'équipe, il peut entraîner sa défaite. Lorsqu'une cellule du corps échappe à sa fonction hiérarchique et commence à se multiplier de manière incontrôlée, le cancer s'installe. Lorsque les étudiants estiment que leur but est de maximiser leurs notes au lieu d'acquérir un savoir, la triche et autres comportements contre-productifs surviennent. Lorsqu'une entreprise corrompt le gouvernement pour bénéficier de ses faveurs, les avantages du marché concurrentiel et le bien de l'ensemble de la société sont mis à mal.

Quand les objectifs d'un sous-système prédominent au détriment de ceux du système dans son ensemble, le comportement qui en résulte est qualifié de **sous-optimisation**.

Bien entendu, la centralisation excessive est tout aussi préjudiciable que la sous-optimisation. Si le cerveau contrôlait chaque cellule si rigoureusement que celle-ci ne pouvait plus assurer sa propre régénération, l'organisme entier mourrait. Si le règlement empêche les étudiants ou les professeurs d'explorer librement les champs de la connaissance, l'objectif de l'université n'est pas servi. Si un entraîneur interfère dans les perceptions qu'un bon joueur a sur le terrain, il risque de nuire à l'équipe. De l'entreprise à la nation, certains exemples économiques de contrôle hiérarchique démesuré ont donné lieu à quelques-unes des plus grandes catastrophes de l'histoire, qui sont loin d'être derrière nous.

Pour qu'un système soit hautement fonctionnel, sa hiérarchie doit établir un équilibre entre le bien-être, les libertés et les responsabilités des sous-systèmes et de l'ensemble du système. Elle doit procurer un contrôle central suffisant pour assurer la coordination permettant au système d'atteindre son objectif, ainsi qu'une autonomie suffisante pour que tous les sous-systèmes parviennent à prospérer, fonctionner et s'auto-organiser.

La résilience, l'auto-organisation et la hiérarchie sont trois des propriétés qui contribuent au bon fonctionnement des systèmes dynamiques. Leur promotion accroît la capacité d'un système à fonctionner correctement à long terme – autrement dit à être durable.

Néanmoins, l'observation des comportements des systèmes peut aussi réserver bien des surprises.

> **Un système hiérarchique évolue de bas en haut.**
> **Les strates supérieures de la hiérarchie ont pour but de servir les objectifs des strates inférieures.**

4.
Pourquoi les systèmes nous surprennent

> « Le problème est […] que nous sommes terriblement ignorants. Les plus savants d'entre nous sont ignorants. L'acquisition de la connaissance implique toujours la révélation de l'ignorance – *réside* presque dans la révélation de l'ignorance. Notre connaissance du monde nous enseigne avant tout que le monde est plus grand que la connaissance que nous en avons. »
> *Wendell Berry, écrivain paysan du Kentucky*[1]

Les systèmes simples du zoo vous ont sans doute déconcerté par leur comportement. Ils continuent à m'étonner alors que je les enseigne depuis des années. Que vous et moi soyons surpris en dit autant sur nous que sur les systèmes dynamiques. En effet, les interactions entre ce que je crois savoir des systèmes dynamiques et mon expérience du monde réel me rendent toujours aussi humble. Elles me rappellent à chaque fois ces trois vérités :

1. Tout ce que nous croyons savoir du monde est un modèle. Chaque mot et chaque langue est un modèle. Tous les livres et bases de données, cartes et statistiques, équations et logiciels sont des modèles. Tout comme les manières dont je me représente le monde dans ma tête – mes modèles *mentaux*. Aucun d'eux n'est ni ne sera jamais le monde *réel*.

2. Nos modèles ont généralement une forte congruence avec le monde, ce qui explique pourquoi notre espèce a si bien réussi dans la bio-sphère. Les modèles mentaux que nous élaborons à partir de

notre expérience intime et directe de la nature, des gens et des organisations qui nous entourent, sont particulièrement complexes et sophistiqués.

3. Cependant, nos modèles sont loin de représenter le monde totalement. Voilà pourquoi nous commettons des erreurs et sommes régulièrement surpris. Dans nos têtes, nous ne sommes capables d'appréhender qu'un petit nombre de variables à la fois. Nous tirons souvent des conclusions illogiques à partir de suppositions correctes, ou des conclusions logiques à partir de suppositions incorrectes. Par exemple, la plupart d'entre nous sont étonnés par la quantité de croissance qu'un processus exponentiel peut générer. Peu d'entre nous parviennent à trouver comment atténuer les oscillations d'un système complexe.

En somme, ce livre repose sur une dualité. Nous savons énormément de choses sur la façon dont notre monde fonctionne, mais c'est loin d'être suffisant. Notre connaissance est formidable, mais notre ignorance l'est davantage encore. Nous avons la possibilité d'améliorer notre compréhension des choses, mais nous n'atteindrons jamais la perfection. Je crois aux deux versants de cette dualité, car j'ai beaucoup appris en étudiant les systèmes.

> **Tout ce que nous croyons savoir du monde est un modèle.**
> Nos modèles ont une forte congruence avec le monde,
> mais ils sont loin de le représenter totalement.

Ce chapitre décrit certaines des raisons pour lesquelles les systèmes dynamiques nous surprennent si souvent. En outre, il recense en partie les façons dont nos modèles mentaux peinent à tenir compte des complications du monde réel – du moins celles que l'on peut appréhender d'un point de vue systémique. Il s'agit d'une liste de mises en garde. Là résident les pièges cachés. Vous ne pourrez naviguer correctement dans un monde interdépendant, dominé par les rétroactions, que si vous cessez de vous concentrer sur les évènements à court terme pour observer la structure et le comportement à long terme, si vous avez conscience des limites

erronées et de la rationalité limitée, si vous prenez en compte les facteurs limitants, les non-linéarités et les délais. Vous risquez de mal traiter, concevoir ou interpréter les systèmes si vous ne respectez pas leurs propriétés de résilience, d'auto-organisation et de hiérarchie.

La mauvaise nouvelle, ou la bonne selon que vous cherchez à contrôler le monde ou que vous souhaitez vous délecter de ses surprises, est que même si vous connaissez toutes ces caractéristiques des systèmes, vous serez probablement surpris moins souvent, mais vous le serez encore.

Captivants évènements

« Un système est fait d'une boîte noire,
Où tout ce qui entre et ce qui en part
Est la seule chose dont nous sommes sûrs,
Car impossible d'ouvrir la serrure.
Percevoir les paires d'entrées et sorties
Et les paramètres qui les relient
Nous permettra d'associer quelquefois
Une entrée, une sortie, un état.
Si la relation reste bonne et stable,
De prédictions nous serons capables,
Mais veuille le ciel n'y rien modifier,
Ou bien le couvercle devrions-nous forcer ! »
Kenneth Boulding, économiste[2]

Les systèmes nous leurrent en se présentant – ou nous nous leurrons nous-mêmes en voyant le monde – comme une série d'évènements. Les nouvelles parlent d'élections, de combats, d'accords politiques, de catastrophes, de booms ou de krachs boursiers. La plupart de nos conversations de tous les jours ont trait

à des faits précis survenus à un moment et en un lieu donnés. Une équipe gagne. Un fleuve déborde. Le Dow Jones culmine à 10 000. Un gisement de pétrole est découvert. Une forêt est rasée. Ces évènements sont les sorties, instant par instant, de la boîte noire du système.

Il peut s'agir d'évènements spectaculaires – accidents d'avion, assassinats, victoires majeures, tragédies effroyables – qui nous prennent aux tripes. Bien que nous en ayons déjà vu des milliers sur nos écrans de télévision ou à la une des journaux, chaque évènement est suffisamment différent du précédent pour que nous soyons fascinés (tout comme nous ne nous lassons jamais des aléas de la météo). Envisager le monde comme une succession d'évènements est éternellement captivant parce qu'un tel point de vue n'a quasiment pas de valeur prédictive ou explicative. À l'instar de la partie émergée d'un iceberg, les évènements sont l'aspect le plus visible d'un complexe plus vaste – mais pas toujours le plus important.

Nous risquons moins d'être surpris lorsque nous sommes capables de voir comment les évènements s'accumulent en schémas comportementaux dynamiques. Ainsi, l'équipe est actuellement dans une bonne passe ; la variation du niveau du fleuve a tendance à augmenter ces derniers temps, avec des crues plus hautes en période de pluies et des baisses de débit plus importantes en période de sécheresse ; le Dow Jones est en hausse depuis deux ans ; les découvertes de gisements pétroliers deviennent moins fréquentes ; les défrichements s'accroissent plus rapidement que jamais.

Le comportement d'un système désigne sa performance au fil du temps – croissance, stagnation, déclin, oscillation, variation aléatoire ou évolution. Si les médias faisaient mieux leur travail en présentant les évènements dans leur contexte historique, nous en aurions une meilleure compréhension au niveau comportemental, qui est plus approfondie qu'au niveau évènementiel. Lorsqu'un penseur systémique rencontre un problème, il commence par rechercher les données, les courbes d'évolution temporelle et l'historique du système. En effet, le comportement à long terme donne des renseignements sur la structure sous-jacente du système. Et la

structure est primordiale pour comprendre non seulement *ce* qui arrive, mais *pourquoi*.

La structure d'un système réside dans ses stocks, flux et boucles de rétroaction et dans les liens qui les unissent. On peut la représenter sous forme de diagramme à l'aide de rectangles et de flèches (qualifié par mes étudiants de schéma « spaghetti-boulette de viande »). La structure détermine les comportements latents du système. Une boucle de rétroaction régulatrice visant un objectif entretient ou tend vers un équilibre dynamique. Une boucle de rétroaction amplificatrice génère une croissance exponentielle. Les deux types de boucle associés peuvent entraîner la croissance, le déclin ou l'équilibre. Lorsque les boucles comportent également des délais, elles sont susceptibles de produire des oscillations. Si elles fonctionnent par à-coups périodiques, elles peuvent donner lieu à des comportements encore plus surprenants.

> **La structure d'un système est la source de son comportement, lequel se manifeste par une succession d'évènements.**

La pensée systémique va et vient constamment entre la structure (diagrammes de stocks, flux et boucles de rétroaction) et le comportement (courbes d'évolution temporelle). Ses spécialistes tentent d'appréhender les liens entre la main qui relâche l'Ondamania (évènement), les oscillations qui en résultent (comportement) et les caractéristiques mécaniques de la bobine hélicoïdale du jouet (structure).

Les exemples simples comme celui de l'Ondamania font clairement ressortir cette distinction « évènement-comportement-structure ». Or dans notre monde, la plupart des analyses ne vont pas creuser au-delà des évènements. Écoutez les explications que l'on vous sert chaque soir à propos de l'évolution de la Bourse. Les cours ont grimpé (ou diminué) parce que le dollar a baissé (ou augmenté), ou que le taux directeur est monté (ou descendu), ou que

les démocrates ont gagné (ou perdu), ou qu'un pays en a envahi un autre (ou pas). L'analyse se cantonne aux évènements.

Ces explications ne vous donnent aucun moyen de prédire ce qui se passera le lendemain. Elles ne vous procurent aucune méthode pour changer le comportement du système – faire en sorte que le marché boursier soit moins volatil, qu'il constitue un indicateur plus fiable de la santé des entreprises ou qu'il favorise davantage les investissements, par exemple.

Les analyses économiques vont pour la plupart creuser un niveau en dessous, jusqu'au comportement au fil du temps. Les modèles économiques s'efforcent d'établir des liens statistiques entre les tendances passées du revenu, de l'épargne, de l'investissement, des dépenses publiques, des taux d'intérêt, de la production ou d'autres facteurs, par le biais d'équations souvent complexes.

Ces modèles basés sur le comportement sont plus utiles que ceux reposant sur les évènements, mais ils posent encore certains problèmes fondamentaux. Premièrement, ils accordent typiquement trop d'importance aux flux et pas assez aux stocks. Les économistes observent le comportement des flux car c'est là que les variations intéressantes et les changements les plus rapides se manifestent au sein d'un système. Aussi la presse économique parle-t-elle de la production nationale (flux) de biens et services, le PIB, et non du capital physique total (stock) des usines, exploitations agricoles et entreprises qui produisent ces biens et services. Or, faute de voir comment les stocks affectent les flux par le biais des processus de rétroaction, on ne peut comprendre la dynamique des systèmes économiques ni les raisons de leurs comportements.

Deuxièmement, et plus important encore, en essayant de trouver des liens statistiques entre différents flux, les économètres statisticiens recherchent une chose qui n'existe pas. Il n'y a aucune raison de s'attendre à ce qu'un flux entretienne une relation stable avec quelque autre flux. Les flux augmentent et diminuent, s'activent et s'interrompent selon toutes sortes de combinaisons, en réponse à des stocks et non à d'autres flux.

Voici un exemple simple pour illustrer mon propos. Supposons que vous ne connaissiez rien aux thermostats mais que vous

disposiez de nombreuses données sur les flux de chaleur entrant et sortant de votre chambre. Vous pourrez établir une équation qui montrera comment ces flux ont varié concomitamment jusque-là, car en temps normal, étant régis par le même stock (la température de la pièce), ils fluctuent simultanément.

Toutefois, votre équation cessera d'être valable lorsqu'un changement surviendra dans la structure du système – quelqu'un ouvre la fenêtre, améliore l'isolation, règle la chaudière ou oublie de commander du fioul. Cette équation vous permettra de prédire la température de la chambre pour le lendemain tant que le système ne changera pas et ne tombera pas en panne. Mais si on vous demande d'augmenter la température ambiante, ou si cette dernière dégringole soudain et que vous devez y remédier, ou si vous voulez bénéficier de la même température ambiante en réduisant votre facture de combustible, votre analyse au niveau du comportement ne vous sera d'aucune aide. Vous devrez explorer la structure du système.

Voilà pourquoi les modèles économétriques basés sur les comportements parviennent assez bien à prédire les performances économiques à court terme, assez mal à deviner les performances à long terme, et très mal à vous dire comment améliorer les performances de l'économie.

Telle est donc l'une des raisons pour lesquelles les systèmes, quels qu'ils soient, nous surprennent. Nous sommes trop captivés par les évènements qu'ils génèrent. Nous prêtons trop peu d'attention à leur histoire. Et nous n'avons pas les compétences suffisantes pour repérer parmi les données antérieures du système les indices relatifs à sa structure dont découlent son comportement et les évènements.

Esprits linéaires dans un monde non linéaire

« La signification [des relations linéaires] est simple : *plus il y en a, mieux c'est*. Les équations linéaires admettent des solutions –

raison pour laquelle on en rencontre autant dans les manuels.
Les systèmes linéaires offrent l'important avantage d'être décomposables : on peut les démonter et les reconstituer, leurs éléments s'emboîtent.
Les systèmes non linéaires, eux, ne sont généralement pas solubles et ne peuvent s'additionner. […] La non-linéarité signifie que le fait de jouer modifie les règles de jeu […]. Si ces influences mutuelles rendent difficile la manipulation de la non-linéarité, elles engendrent en revanche une diversité de comportements que l'on ne rencontre jamais dans les systèmes linéaires. »
James Gleick, auteur de La Théorie du chaos[3]

Nous avons souvent de piètres compétences lorsqu'il s'agit d'appréhender la nature des relations. Une **relation linéaire** entre deux éléments d'un système peut être représentée sur un graphique par une ligne droite. La proportion entre les deux variables est constante. Si je répands 10 kg d'engrais sur mon champ, son rendement augmentera de 7 quintaux. Si j'en répands 20 kg, le rendement augmentera de 14 quintaux. Et si j'en utilise 30 kg, j'obtiendrai un rendement de 21 quintaux.

On parle de **relation non linéaire** quand l'effet n'est pas proportionnel à la cause. Une telle relation peut seulement être représentée par une courbe ou un trait ondulé, et non par une ligne droite. Si j'applique 100 kg d'engrais, mon rendement augmentera de 35 quintaux ; si j'en mets 200 kg, le rendement n'augmentera pas du tout ; et si j'en mets 300 kg, le rendement diminuera. Pourquoi ? J'ai détérioré mon sol en « abusant des bonnes choses ».

Le monde regorge de non-linéarités, si bien qu'il surprend souvent nos modes de pensée linéaires. Ayant appris qu'une petite impulsion génère une petite réaction, nous pensons qu'une impulsion deux fois supérieure produira une réaction deux fois plus forte. Mais dans un système non linéaire, une impulsion deux fois

plus importante peut entraîner une réaction d'un sixième, du carré, ou rien du tout.

Voici quelques exemples de non-linéarités :

• Lorsque le trafic augmente sur une autoroute, la vitesse des véhicules n'est affectée que légèrement sur un large spectre de densités de trafic. Au-delà d'un certain seuil néanmoins, une faible augmentation de la densité entraîne une diminution rapide de la vitesse. Et quand la quantité de voitures atteint un certain point, un bouchon se forme et la vitesse descend à zéro.

• La dégradation du sol peut se poursuivre durant de longues années sans affecter le rendement des cultures outre mesure. Mais dès lors que la couche arable sera épuisée jusqu'au fond de la zone racinaire des plantes, une légère dégradation supplémentaire pourra faire dégringoler le rendement.

• Un peu de publicité de bon goût peut susciter l'intérêt pour un produit, mais un matraquage incessant risque de provoquer une aversion pour celui-ci.

Vous comprenez pourquoi les non-linéarités occasionnent des surprises. Elles déjouent l'attente rationnelle selon laquelle si un petit remède fait un peu de bien, une dose importante en fera beaucoup – ou inversement, si une action destructrice limitée entraîne des dommages tolérables, la même action d'envergure un peu supérieure ne causera qu'un peu plus de dommages. Dans un monde non linéaire, de telles attentes génèrent des erreurs typiques.

Les non-linéarités sont importantes non seulement parce qu'elles confondent nos attentes quant au lien entre action et réaction, mais surtout parce qu'elles *modifient les forces relatives des boucles de rétroaction*. Elles peuvent ainsi faire passer un système d'un schéma comportemental à un autre.

Ces non-linéarités sont la principale cause de la prédominance relative qui caractérise plusieurs systèmes du zoo – le basculement soudain d'une croissance exponentielle induite par une boucle amplificatrice dominante, par exemple, vers un déclin généré par une boucle régulatrice devenue tout à coup dominante.

Leurs conséquences peuvent être spectaculaires, comme en témoigne l'infestation des forêts nord-américaines par la tordeuse

des bourgeons de l'épinette.

INTERLUDE

La tordeuse des bourgeons de l'épinette, les sapins et les pesticides

Les analyses de cernes de croissance montrent que la tordeuse des bourgeons de l'épinette tue périodiquement les sapins et les épicéas en Amérique du Nord depuis au moins 400 ans. Jusqu'au XX^{e} siècle, nul ne s'en est guère soucié. L'industrie forestière utilisait le pin blanc, considérant le sapin et l'épicéa comme de la « mauvaise herbe ». Cependant, après avoir épuisé les réserves de pin, elle s'est rabattue sur les autres résineux. Et soudain la tordeuse des bourgeons est devenue un nuisible considérable aux yeux des forestiers. Si bien qu'à partir des années 1950, du DDT a été pulvérisé sur les forêts du Nord afin de lutter contre la tordeuse. L'insecte réapparaissant chaque année, les épandages se sont poursuivis jusqu'aux années 1980. À la suite de l'interdiction du DDT, les forestiers ont recouru au fénitrothion, à l'acéphate, au Sevin et au méthoxychlore. Les pesticides n'étaient plus considérés comme la solution suprême, mais ils étaient encore jugés essentiels. « Les insecticides nous font gagner du temps, disait un forestier. C'est tout ce que veut l'exploitant ; préserver les arbres jusqu'à ce qu'ils soient bons pour la scierie. »

En 1980, les coûts d'épandage avaient pris des proportions considérables – la province canadienne du Nouveau-Brunswick a dépensé 12,5 millions de dollars cette année-là pour « contrôler » la tordeuse des bourgeons. Des citoyens inquiets réclamaient que l'on cesse d'arroser le paysage avec des poisons. Et malgré les épandages, la tordeuse continuait à anéantir 20 millions d'hectares d'arbres par an.

C. S. Holling de l'Université de Colombie-Britannique et Gordon Baskerville de l'Université du Nouveau-Brunswick ont élaboré un modèle informatique afin d'envisager dans sa globalité le problème de la tordeuse des bourgeons. Ils ont

découvert qu'avant le début des épandages, l'insecte était à peine décelable la plupart des années. En effet, sa population était régulée par un certain nombre de prédateurs, parmi lesquels des oiseaux, une araignée et une guêpe parasitoïde, ainsi que par plusieurs maladies. Néanmoins, une infestation de tordeuses survenait à un intervalle de 3 à 4 décennies, pour une durée de 6 à 10 ans. Puis sa population déclinait, pour ressurgir ensuite.

La tordeuse des bourgeons s'attaque de préférence au sapin baumier, puis à l'épicéa, désigné au Canada sous le nom d'épinette. Le sapin baumier est l'arbre le plus compétitif de la forêt septentrionale. Si on le laissait faire, il supplanterait l'épicéa et le bouleau, transformant la forêt en monoculture. Chaque infestation de tordeuses réduit la population de sapins au profit de l'épicéa et du bouleau. Puis le sapin revient en lice.

Plus la population de sapins s'accroît, plus la probabilité d'infestation s'accroît – de manière *non linéaire*. En effet, le potentiel de reproduction de l'insecte augmente plus que proportionnellement à la disponibilité de son aliment favori. L'ultime déclencheur consiste en deux ou trois printemps chauds et secs qui contribuent idéalement à la survie des larves de la tordeuse. (Si vous analysez les choses sous l'angle des évènements, vous imputerez l'épidémie aux printemps chauds et secs.)

La population de tordeuses des bourgeons progresse trop vite – *non linéairement* – pour que ses ennemis naturels la réfrènent. Dans la plupart des cas, l'accroissement de la population d'insectes entraîne une multiplication plus rapide de ses prédateurs. Mais au-delà d'un certain seuil, ces derniers ne peuvent plus accélérer leur reproduction. Ce qui était une relation amplificatrice – plus les tordeuses sont nombreuses, plus les prédateurs se multiplient rapidement – devient une non-relation – la population d'insectes continue à s'accroître, mais les prédateurs ne se reproduisent pas plus vite –, si bien que les tordeuses pullulent sans entraves.

Une seule chose peut mettre un terme à l'invasion : les insectes réduisent leur propre source alimentaire en éliminant les sapins. Lorsque cela se produit, la population de tordeuses s'effondre – *non linéairement*. La boucle amplificatrice de reproduction des insectes perd sa position dominante au profit de la boucle régulatrice qui les affame. L'épicéa et le bouleau investissent alors les espaces abandonnés par les sapins, et le cycle recommence.

Le système tordeuse/épicéa/sapin oscille selon une période de plusieurs décennies, mais il est écologiquement stable dans certaines limites. Il peut se perpétuer à l'infini. La tordeuse des bourgeons a principalement pour effet de permettre aux espèces d'arbres autres que le sapin de perdurer. Mais dans le cas présent, ce qui est écologiquement stable est économiquement instable. L'économie de l'est du Canada dépend presque entièrement de l'industrie forestière, laquelle dépend d'un approvisionnement régulier en sapins et en épicéas. L'épandage d'insecticides oblige l'ensemble du système à s'équilibrer de manière instable en différents points de ses relations non linéaires. Il élimine non seulement les insectes nuisibles mais leurs ennemis naturels, affaiblissant ainsi la boucle de rétroaction qui tient normalement les tordeuses en respect. Il maintient la population de sapins à une densité élevée, faisant monter les tordeuses le long de leur courbe de reproduction non linéaire jusqu'au point où elles sont en permanence au bord de l'explosion démographique.

Ces pratiques de gestion forestière ont entraîné des conditions qualifiées par Holling de « semi-épidémie permanente » sur des étendues de plus en plus vastes. L'industrie forestière se retrouve « enfermée dans une politique caractérisée par le bouillonnement d'un volcan naissant », au point que l'échec de cette politique entraînerait « une épidémie d'une intensité jamais observée auparavant »[4].

> **De nombreuses relations au sein des systèmes sont non linéaires.** Leurs forces relatives changent de manière disproportionnée à mesure que les stocks du système évoluent. La non-linéarité des processus de rétroaction entraîne une prédominance relative des boucles ainsi que diverses complexités dans le comportement des systèmes.

L'absence de limites

« Quand nous réfléchissons en termes de systèmes, nous constatons qu'une méprise fondamentale est inhérente au terme courant d'"effets secondaires" […]. Cette expression signifie en gros "des effets que je n'avais pas prévus ou auxquels je ne veux pas penser" . [Or] ils ne méritent pas plus le qualificatif de "secondaire" que l'effet "principal" . Il est difficile de penser en termes de systèmes, et nous tordons volontiers notre langue pour nous protéger de la nécessité de le faire. »
Garrett Hardin, écologue[5]

Vous rappelez-vous les nuages des diagrammes structurels des deux premiers chapitres ? Méfiez-vous d'eux ! Ce sont les principales sources de surprises systémiques.

Les nuages des schémas représentent l'origine et la destination des flux. Ce sont des stocks – sources et puits – que nous ignorons pour l'instant afin de simplifier la présente discussion. Ils indiquent la limite du diagramme d'un système. Ils indiquent rarement une limite réelle, car les systèmes en sont rarement dotés. Toutes choses sont liées entre elles, dit-on, et pas de façon nette. Il n'y a pas de limite clairement déterminable entre la mer et la terre, entre la

sociologie et l'anthropologie, entre les gaz d'échappement d'une voiture et votre nez. Il n'y a que des limites de mots, de pensée, de perception et de consensus social – des frontières artificielles reposant sur un modèle mental.

Les plus grandes complexités se manifestent précisément aux limites. Il y a des Tchèques du côté allemand de la frontière, et des Allemands du côté tchèque. Les espèces forestières s'étendent au-delà de la lisière jusque dans le champ contigu ; les espèces agricoles pénètrent en partie dans la forêt. Ces bordures mixtes et désordonnées sont source de diversité et de créativité.

Dans notre zoo des systèmes, par exemple, j'ai représenté le flux de voitures vers le parking du concessionnaire comme s'il venait d'un nuage. Bien évidemment, les véhicules proviennent non pas d'un nuage, mais de la transformation d'un stock de matières à l'aide de capital, de main-d'œuvre, d'énergie, de technologie et de management (les moyens de production). De même, le flux de voitures quittant le parking ne termine pas dans un nuage, mais dans les foyers ou les entreprises par l'intermédiaire de la vente.

L'intérêt de représenter les stocks de matières ou ceux des foyers (qui justifierait de les faire figurer sur le diagramme avec leurs nuages) dépend du fait que ces stocks soient susceptibles ou non d'influer significativement sur le comportement du système au cours de la période envisagée. Si nous sommes certains que les matières seront abondantes et que les consommateurs continueront à avoir besoin des produits, nous nous contenterons de les représenter sous forme de nuages. En revanche, si une pénurie de matières ou une saturation du marché sont imaginables, et si nous traçons autour du système une limite mentale excluant ces stocks, nous risquons d'être surpris par les évènements futurs.

La figure 47 comporte toujours des nuages. La limite peut être repoussée plus loin encore. Les matières transformées sont issues d'usines chimiques, de hauts-fourneaux ou de raffineries dont les intrants viennent de la terre. Leur transformation crée non seulement des produits finis, mais des emplois, des salaires, des profits et de la pollution. Une fois devenus obsolètes, les produits terminent dans des décharges, des incinérateurs ou des centres de recyclage où ils

entraînent de nouveaux effets sur la société et l'environnement. Les décharges occasionnent le lessivage de substances vers les puits d'eau potable, les incinérateurs rejettent de la fumée et des cendres, les centres de recyclage réintroduisent les matières dans le flux de production.

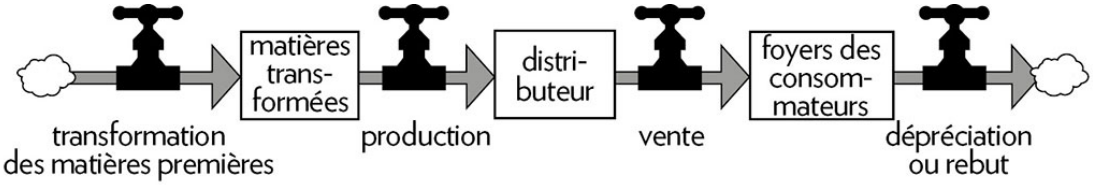


Figure 47. Mise en évidence de certains stocks se cachant derrière les nuages.

L'intérêt de réfléchir à l'intégralité du flux depuis la mine jusqu'à la décharge, ou « du berceau à la tombe » comme disent les industriels, dépend de qui veut savoir, dans quel but et sur quelle durée. À long terme, l'intégralité du flux a son importance. Et plus l'économie physique et l'« empreinte écologique » augmentent, plus le long terme va devenir le court terme. Les décharges se remplissent à une rapidité qui surprend ceux dont les modèles mentaux voient les déchets disparaître au loin dans une sorte de nuage. Les sources de matières premières – mines, puits et gisements de pétrole – peuvent également s'épuiser à une vitesse déconcertante.

À une échéance suffisamment longue, les mines et les décharges elles-mêmes ne résument pas tout. Les grands cycles écologiques de la Terre ne cessent de déplacer les matières, d'ouvrir et de refermer les mers, de soulever et d'araser les montagnes. D'ici quelques millions d'années, le contenu de nos décharges se retrouvera au sommet d'une montagne ou au fond d'un océan. De nouveaux gisements de métaux et de pétrole se formeront. Sur notre planète, il n'y a pas de « nuage » systémique, pas de limite ultime. Les vrais nuages dans le ciel font eux-mêmes partie d'un cycle hydrologique. Tout élément physique vient de quelque part, tout va quelque part, tout bouge sans cesse.

Cela ne veut pas dire que tout modèle, qu'il soit mental ou informatique, doive tenir compte de la moindre relation jusqu'à

inclure l'ensemble de la planète. Les nuages font nécessairement partie des modèles décrivant des flux métaphysiques. La colère sort littéralement d'un nuage, tout comme l'amour, la haine, l'estime de soi, etc. Afin de comprendre toute chose, nous devons simplifier, et par conséquent définir des limites. Ce qui est souvent raisonnable. Cela ne pose généralement aucun problème, par exemple, d'envisager une population en termes de naissances issues d'un nuage et de décès allant vers un autre nuage, comme indiqué à la figure 48.

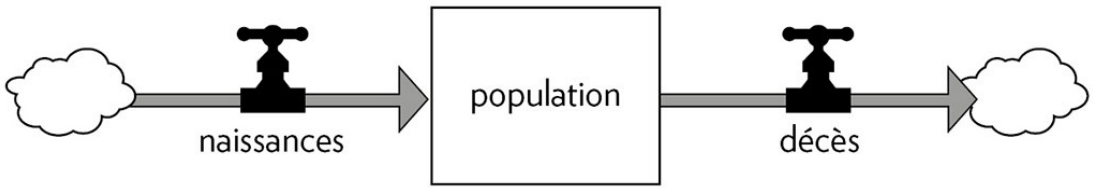


Figure 48. Autres nuages.

Ce diagramme illustre littéralement les limites « du berceau à la tombe ». Cependant, celles-ci ne seraient d'aucune utilité si la population envisagée connaissait une immigration ou une émigration significative, ou si le problème étudié se cantonnait au manque de place dans les cimetières.

Les penseurs systémiques eux-mêmes peinent à tirer une leçon des limites. Il n'existe pas de limite unique et légitime pour définir un système. Nous devons inventer des limites dans un souci de clarté et de rationalité ; et les limites peuvent engendrer des problèmes si nous oublions que nous les avons créées artificiellement.

Si vous fixez des limites trop restreintes, le système vous surprendra. Par exemple, si vous tentez de résoudre les problèmes de trafic urbain sans vous préoccuper d'aménagement du territoire, vous construirez des autoroutes qui attireront des projets immobiliers tout au long de celles-ci. Les nouveaux habitants feront circuler davantage de voitures sur les autoroutes, qui seront à nouveau aussi engorgées qu'auparavant.

> **Il n'y a pas de système indépendant. Le monde est un continuum. La délimitation d'un système dépend de l'objectif de l'étude** – de la question que l'on veut poser.

Si vous tentez de résoudre un problème d'eaux usées en déversant celles-ci dans une rivière, la présence de villes en aval implique clairement que la limite doit englober l'ensemble du cours d'eau. Votre réflexion pourra en outre inclure le sol et la nappe phréatique aux alentours, mais sans doute pas le bassin versant limitrophe ni le cycle hydrologique planétaire.

Auparavant, la planification d'un parc national s'arrêtait à ses frontières physiques. Or ces dernières sont régulièrement traversées par des populations nomades, des animaux migrateurs, des cours d'eau ou des nappes phréatiques. En outre, elles sont impactées par le développement économique aux abords du parc, les pluies acides, et désormais le changement climatique dû aux gaz à effet de serre. Même en l'absence de changement climatique, la gestion d'un parc naturel nécessite d'envisager des limites plus larges que son périmètre officiel.

Cependant, les analystes systémiques tombent souvent dans l'excès inverse en choisissant des limites trop vastes. Ils ont l'habitude de produire des diagrammes qui recouvrent plusieurs pages en petits caractères et d'innombrables flèches reliant tout à tout. « *Voilà* le système ! » affirment-ils. Si vous réduisez un tant soit peu votre champ d'études, vous serez considéré comme illégitime dans le milieu académique.

À jouer ainsi à « mon modèle est plus grand que le tien », ils aboutissent à des analyses extrêmement complexes générant des monceaux d'informations qui ne peuvent qu'occulter les réponses aux questions posées. Par exemple, modéliser le climat de la Terre avec force détails est intéressant pour diverses raisons, mais n'est sans doute pas nécessaire pour trouver le moyen de réduire les émissions de CO_2 d'un pays afin de limiter le changement climatique.

La limite adéquate pour réfléchir à un problème coïncide rarement avec les limites d'une discipline académique ou avec une frontière politique. Les fleuves sont commodes pour séparer les pays, mais constituent les pires frontières pour gérer la quantité et la qualité de l'eau. Et l'air est pire que l'eau par son obstination à franchir les délimitations politiques. Les frontières nationales ne riment à rien en matière d'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, d'émissions de gaz à effet de serre ou de pollution marine.

Dans l'idéal, nous serions dotés d'une flexibilité mentale nous permettant de trouver la limite appropriée pour réfléchir à chaque nouveau problème. Mais nous témoignons rarement d'une telle souplesse. Nous restons attachés aux limites auxquelles nos esprits se sont habitués. Pensez au nombre de polémiques qui ont trait à des limites – frontières nationales, ethniques ou commerciales, limites entre responsabilité publique et privée, barrières entre les riches et les pauvres, entre les pollueurs et les victimes, entre les personnes vivantes et les générations à venir. Les universitaires pourraient débattre pendant des années sur les limites entre économie et gouvernement, art et histoire de l'art, littérature et critique littéraire. Trop souvent, les universités sont des monuments vivants à la rigidité des limites.

Tout l'art consiste à se rappeler que *c'est vous qui déterminez les limites, et que vous avez le pouvoir et le devoir de les reconsidérer* à *chaque nouveau débat, problème ou objectif*. C'est un défi de rester suffisamment créatif pour abandonner les limites qui ont fonctionné pour le problème précédent et trouver celles qui seront les plus appropriées pour le suivant. Mais c'est une nécessité si l'on veut correctement résoudre les difficultés.

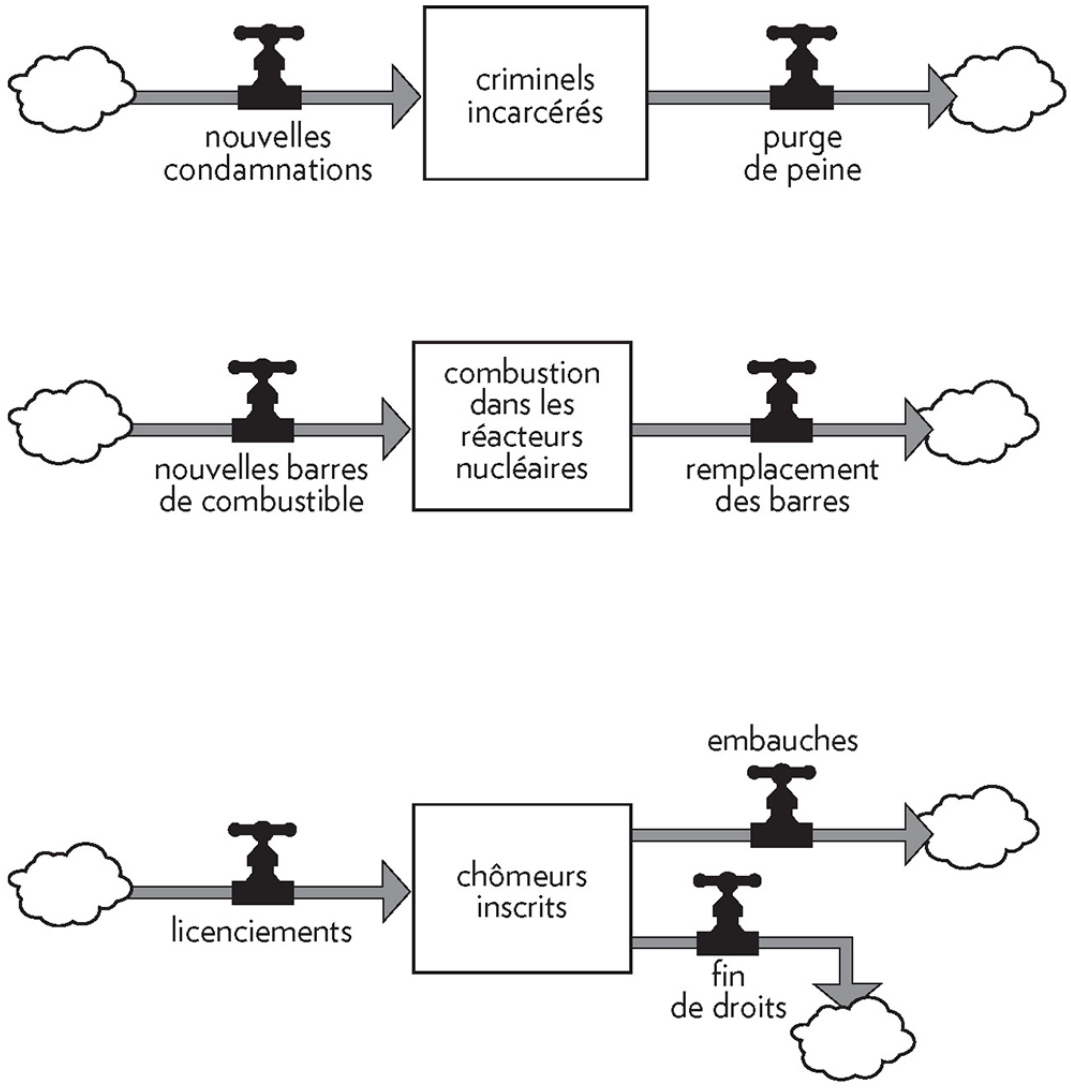


Figure 49. Autres exemples de nuages. Une limite ou un nuage ne devrait pas vous empêcher de penser au-delà des frontières du système, mais au contraire vous y inciter. Qu'est-ce qui favorise l'arrivée de nouvelles condamnations ? Où vont les barres d'uranium après leur remplacement ? Qu'advient-il des chômeurs en fin de droits ?

Les strates de limites

Les systèmes nous surprennent parce que nos esprits aiment à penser que des causes uniques engendrent des effets uniques. De plus, nous détestons penser aux limites, notamment lorsque nos propres désirs et projets sont en jeu.

Cependant, nous vivons dans un monde où de nombreuses causes se conjuguent souvent pour entraîner de nombreux effets. De multiples entrées génèrent de multiples sorties, et la quasi-totalité des entrées, et par conséquent des sorties, est soumise à des limites. Par exemple, le fonctionnement d'une usine nécessite :

- un capital ;
- une main-d'œuvre ;
- de l'énergie ;
- des matières premières ;
- un terrain ;
- de l'eau ;
- des technologies ;
- des prêts ;
- des assurances ;
- des clients ;
- une gestion appropriée ;
- des infrastructures et des services gouvernementaux financés par des fonds publics (police, protection contre le feu, formation des ouvriers et des managers, etc.) ;
- des familles qui fonctionnent pour élever et prendre soin aussi bien des producteurs que des consommateurs ;
- un écosystème en bonne santé permettant de fournir ou de soutenir tous ces intrants et d'absorber ou d'éliminer leurs déchets.

Tandis qu'un champ de blé nécessite :

- la lumière du soleil ;
- de l'air ;
- de l'eau ;
- de l'azote ;
- du phosphore ;
- du potassium ;
- des dizaines de micronutriments ;
- un sol friable doté d'une population microbienne adéquate ;
- un système de contrôle des mauvaises herbes et des ravageurs ;
- une protection contre les effluents de l'usine.

C'est au sujet de la production de blé que Justus von Liebig a énoncé la fameuse « loi du minimum » ou « loi des facteurs limitants ». Peu importe la quantité d'azote dont dispose la plante si elle manque de phosphore. Et rien ne sert de l'amender en phosphore si le potassium est trop bas.

Le pain ne gonflera pas sans levain, peu importe la quantité de farine que vous y mettrez. Un enfant ne se développera pas sans protéines, peu importe la quantité de glucides qu'il ingèrera. Une entreprise n'ira pas loin sans énergie, peu importe son nombre de clients – ou sans clients, peu importe la quantité d'énergie dont elle dispose.

Cette notion de **facteur limitant** est simple, mais souvent mal comprise. Ainsi, les agronomes estiment savoir ce que doit contenir un engrais artificiel parce qu'ils ont identifié la plupart des nutriments et micronutriments d'un sol de bonne qualité. Mais y a-t-il d'autres nutriments essentiels qu'ils n'auraient pas déterminés ? Comment les engrais synthétiques affectent-ils les communautés microbiennes du sol ? Affectent-ils et, par conséquent, limitent-ils d'autres fonctions d'un sol de qualité ? Et qu'est-ce qui limite la production d'engrais chimiques ?

> **À tout moment, l'intrant le plus important d'un système est celui qui est le plus limitant.**

Les nations riches transfèrent capitaux et technologies vers les pays pauvres et se demandent pourquoi les économies de leurs bénéficiaires ne se développent pas pour autant, sans jamais penser au fait que le capital et la technologie pourraient ne pas être les facteurs les plus limitants.

L'économie a pris son essor à une époque où la main-d'œuvre et le capital étaient les facteurs qui limitaient le plus couramment la production. Par conséquent, les fonctions économiques de production ne prennent en compte que ces deux facteurs (et parfois la technologie). Cependant, à mesure que l'économie croît par rapport à l'écosystème et que les facteurs limitants deviennent l'eau

potable, l'air salubre, l'élimination des déchets et les formes acceptables d'énergie et de matières premières, il est de moins en moins judicieux de se concentrer exclusivement sur le capital et la main-d'œuvre.

L'un des principaux modèles enseignés aux étudiants en systémique du Massachusetts Institute of Technology est celui de Jay Forrester relatif à la croissance d'une entreprise. Au départ, une jeune entreprise se développe rapidement. Son problème réside dans son incapacité à percevoir et gérer l'évolution de ses limites, qui changent en réponse à sa propre croissance.

Par exemple, l'entreprise embauche des commerciaux si efficaces qu'ils génèrent des commandes plus vite que l'usine n'est capable de produire. Les délais de livraison augmentent et des clients sont perdus car la capacité de production est le facteur le plus limitant. Si bien que les dirigeants accroissent le stock de capital de l'usine. De nouvelles personnes sont embauchées à la hâte et insuffisamment formées. La qualité en pâtit et la clientèle diminue car la qualification de la main-d'œuvre est le facteur le plus limitant. Si bien que la direction investit dans la formation des ouvriers. La qualité remonte, les commandes affluent à nouveau, mais le système d'exécution des commandes et de tenue des registres s'engorge. Et ainsi de suite.

Chaque plante, enfant, épidémie, nouveau produit, avancée technologique, entreprise, ville, économie ou population qui croît est soumis à des strates de limites. Il importe non seulement d'identifier le facteur limitant, mais de prendre conscience que *la croissance elle-même réduit ou amplifie les limites*, modifiant par conséquent ce qui restreint le système. L'interaction entre une plante et le sol, entre une entreprise en plein essor et son marché ou entre une économie en expansion et sa base de ressources est dynamique. Lorsqu'un facteur cesse d'être limitant, la croissance survient et modifie la rareté relative des différents facteurs jusqu'à ce que l'un d'eux devienne à son tour limitant. Déplacer son attention des facteurs abondants vers le prochain facteur potentiellement limitant permet d'avoir une véritable compréhension et maîtrise du processus de croissance.

Toute entité physique soumise à de multiples entrées et sorties – une population, un processus de production, une économie – est

entourée de strates de limites. En se développant, le système interagit avec et affecte ses propres limites. L'entité en croissance et son environnement limité forment un système dynamique coévolutif.

Toutefois, connaître les strates de limites et veiller au prochain facteur limitant ne garantit pas une croissance perpétuelle. Pour toute entité physique dans un environnement fini, la croissance perpétuelle est impossible. En définitive, le meilleur choix consiste non pas à croître éternellement, mais à décider dans quelles limites on veut vivre. Si une entreprise offre un produit ou service parfait à un prix abordable, elle croulera sous les commandes jusqu'à atteindre un seuil de croissance où une limite fera baisser la perfection du produit ou monter son prix. Si une ville répond mieux que toute autre aux désirs de tous ses habitants, les gens y afflueront jusqu'à ce qu'une limite réduise la capacité de la municipalité à satisfaire les besoins de ses administrés[6].

> **Toute entité physique soumise à de multiples entrées et sorties est entourée de strates de limites.**

Il y aura toujours des limites à la croissance. Si nous ne nous les imposons pas nous-mêmes, le système le fera. Aucune entité physique ne peut croître éternellement. Si les dirigeants d'une entreprise, les autorités d'une ville ou la population humaine ne choisissent pas et ne font pas respecter leurs propres limites afin que leur croissance n'excède pas la capacité de l'environnement à les soutenir, alors c'est l'environnement qui choisira et fera respecter ces limites.

> **Il y aura toujours des limites à la croissance. Si nous ne nous les imposons pas nous-mêmes, le système le fera.**

L'omniprésence des délais

« Je constatai ainsi avec effroi que mon impatience à l'égard du rétablissement de la démocratie avait quelque chose de communiste. Ou plus généralement, quelque chose de rationaliste, l'unité des Lumières.
J'avais voulu faire avancer l'histoire de la même manière qu'un enfant tire sur une plante pour la faire pousser plus vite.
Je crois qu'il faut apprendre à attendre comme on apprend à créer.
Il faut semer patiemment les graines, arroser avec assiduité la terre où elles sont semées et accorder aux plantes le temps qui leur est propre.
On ne peut duper une plante, pas plus qu'on ne peut duper l'Histoire. »
Václav Havel, dramaturge, dernier président de la Tchécoslovaquie et premier président de la République tchèque[7]

Il faut du temps pour qu'une plante, une forêt ou une démocratie se développent ; du temps pour que les lettres mises à la boîte parviennent à destination, du temps pour que les consommateurs intègrent l'information d'un changement de prix et modifient leur comportement, pour qu'une centrale nucléaire soit construite, qu'une machine s'use ou qu'une nouvelle technologie pénètre une économie.

Nous sommes à chaque fois surpris de voir à quel point les choses prennent du temps. Quand nous modélisions un délai de construction ou de fabrication, Jay Forrester nous conseillait de demander à chaque intervenant du système son estimation, d'en déduire notre propre évaluation, puis de la multiplier par trois. (Ce facteur de correction fonctionne également à merveille, ai-je constaté, pour prévoir le temps nécessaire à la rédaction d'un livre !)

Les délais sont omniprésents au sein des systèmes. Chaque stock est un délai. La plupart des flux impliquent des délais –

d'expédition, d'anticipation, de fabrication, de maturation. Voici quelques-uns des délais que nous avons jugé important d'inclure dans divers modèles que nous avons élaborés :

- le délai entre la contamination et le moment où l'on est suffisamment malade pour être diagnostiqué – quelques jours à plusieurs années selon la maladie ;
- le délai entre l'émission d'un polluant et le moment où sa diffusion, percolation ou concentration dans l'écosystème devient nocive ;
- le délai de gestation ou de maturation pour l'élevage d'animaux ou la culture de plantes, entraînant les oscillations caractéristiques du prix des denrées alimentaires – cycles de 4 ans pour le porc, 7 ans pour la vache, 11 ans pour le cacaoyer[8] ;
- le délai de changement des normes sociales relatives à la taille désirable d'une famille – au moins une génération ;
- le délai de réoutillage d'une chaîne de production et de renouvellement du stock de capital. Il faut 3 à 8 ans pour concevoir une nouvelle voiture et la mettre sur le marché. Ce modèle aura une durée de vie de 5 ans sur le marché des véhicules neufs. Et une voiture circule en moyenne 10 à 15 ans.

À l'instar des limites que vous choisirez pour modéliser un système, les délais dépendront de l'objet. Si vous vous intéressez à des oscillations qui atteignent plusieurs semaines, vous n'aurez sans doute pas besoin de réfléchir aux délais qui représentent quelques minutes ou des années. Si vous vous préoccupez du développement d'une population et de son économie sur plusieurs décennies, vous pourrez généralement ignorer les oscillations sur quelques semaines. Le monde scrute, râle, s'ébroue et rugit selon diverses fréquences à la fois. Le délai significatif dépendra – habituellement – de la gamme de fréquences que vous cherchez à étudier.

Le zoo des systèmes nous a déjà montré à quel point les délais de rétroaction conditionnent le comportement d'un système. Modifier la longueur d'un délai peut changer un comportement du tout au tout. Lorsqu'ils sont susceptibles d'être allongés ou raccourcis, les délais constituent souvent des points de levier sensibles dans l'orientation d'une politique. Vous comprenez bien pourquoi. Si un

point de décision d'un système (ou un individu y travaillant) réagit à une information différée, ou le fait avec retard, les décisions seront caduques. Les actions entreprises seront excessives ou insuffisantes pour atteindre les objectifs du décideur. Inversement, si l'action est lancée trop vite, elle risque d'amplifier brutalement une variation à court terme et d'entraîner une instabilité inopportune. Les délais déterminent la rapidité de réaction des systèmes, la précision avec laquelle ils atteignent leurs objectifs et la ponctualité avec laquelle l'information circule en leur sein. Les dépassements, les oscillations et les effondrements sont toujours causés par des délais.

Comprendre les délais permet de saisir pourquoi Mikhaïl Gorbatchev a pu transformer quasiment du jour au lendemain le système d'information de l'Union soviétique, mais pas son économie physique – ce qui nécessite des décennies. Cela nous aide à voir pourquoi la réunification de l'Allemagne a généré des difficultés supplémentaires plus longtemps que les politiciens ne l'avaient anticipé. Du fait des longs délais qu'exige la construction de nouvelles centrales nucléaires, le secteur de l'électricité est soumis à des cycles de surcapacité puis de sous-capacité entraînant des coupures de courant. Du fait de délais de plusieurs décennies avant que les océans ne réagissent à la hausse des températures, les émissions humaines de combustibles fossiles ont déjà occasionné des modifications du climat qui ne deviendront flagrantes que dans une génération ou deux.

> **Lorsqu'un long délai entre en jeu dans une boucle de rétroaction, une certaine anticipation est essentielle.**
> Se contenter d'agir au moment où le problème devient flagrant reviendrait à manquer une occasion décisive de le résoudre.

La rationalité limitée

« Comme chaque individu s'efforce dans la mesure du possible à la fois d'employer son capital à soutenir l'industrie domestique, et de diriger cette industrie de façon à ce que son produit puisse être de la plus grande valeur, […] il n'entre généralement pas dans son intention de faire avancer l'intérêt public, et il ne sait généralement pas non plus combien il le fait avancer. […] Il ne vise que sa propre sécurité ; […] il ne vise que son propre gain. Et il est en ce cas, comme en bien d'autres, conduit par une main invisible pour faire avancer une fin qui ne faisait point partie de son intention. […] En poursuivant son propre intérêt il fait souvent avancer celui de la société plus efficacement que s'il y visait vraiment. »

Adam Smith, économiste politique du XVIII^e siècle[9]

Il serait merveilleux que la « main invisible » du marché pousse réellement les individus à prendre des décisions contribuant au bien de tous. Non seulement l'égoïsme matériel serait une vertu sociale, mais les modèles mathématiques de l'économie seraient beaucoup plus faciles à élaborer. Nous n'aurions aucun besoin de penser au bien d'autrui ou au fonctionnement complexe des systèmes de rétroaction. Il n'est guère étonnant que le modèle d'Adam Smith ait suscité un tel engouement durant deux siècles !

Malheureusement, le monde nous offre d'innombrables exemples d'individus qui agissent rationnellement eu égard à leurs intérêts à court terme et génèrent des résultats globaux qui ne plaisent à personne. Les touristes s'agglutinent dans des lieux comme Honolulu ou Zermatt et se plaignent ensuite que ces sites soient gâchés par l'affluence des visiteurs. Les agriculteurs produisent des excédents de céréales, de beurre ou de fromage et les prix dégringolent. Les pêcheurs exploitent les ressources halieutiques à outrance, mettant en péril leur propre moyen de subsistance. Collectivement, les entreprises décident d'investissements qui

entraînent des récessions. Les gens pauvres font plus d'enfants qu'ils ne peuvent en entretenir.

Pourquoi ?

À cause de ce que l'économiste de la Banque mondiale Herman Daly qualifie de « pied invisible » ou de ce que le prix Nobel d'économie Herbert Simon appelle la **rationalité limitée**[10].

Selon le concept de rationalité limitée, les individus prennent des décisions assez raisonnables en se fondant sur les informations qu'ils possèdent. Cependant, ils ne disposent pas d'informations parfaites, en particulier concernant les parties les plus lointaines du système. Les pêcheurs ne savent pas combien de poissons se trouvent dans leur zone, et encore moins combien seront pêchés par leurs collègues ce jour-là.

Les hommes d'affaires ne connaissent pas avec certitude les investissements que leurs concurrents envisagent, ce que les consommateurs auront envie d'acheter, ni comment leurs produits se comporteront sur le marché. Ils ne connaissent pas leur part de marché actuelle ni la taille de ce marché. Les informations auxquelles ils ont accès sont partielles et différées, et leurs propres réactions sont décalées. Si bien qu'ils investissent systématiquement trop ou trop peu.

Selon Simon, nous ne sommes pas des optimisateurs omniscients et rationnels. Au lieu de cela, nous faisons en sorte de satisfaire nos besoins suffisamment avant de passer à la décision suivante[11]. Nous nous efforçons de servir nos propres intérêts immédiats de manière rationnelle, mais nous ne pouvons tenir compte que de ce que nous savons. Nous ignorons ce que les autres prévoient de faire, jusqu'à ce qu'ils le fassent. Nous avons rarement sous les yeux tout l'éventail des possibilités. Bien souvent, nous ne prévoyons pas (ou choisissons d'ignorer) les impacts de nos actions sur l'ensemble du système. Si bien qu'au lieu de concevoir une solution optimale à long terme, nous identifions dans notre champ limité un choix qui nous convient pour l'instant et auquel nous nous tiendrons, ne changeant de comportement que le jour où nous y serons forcés.

Selon les chercheurs en sciences comportementales, nous n'interprétons déjà pas à la perfection les informations imparfaites

dont nous disposons. Nous percevons mal les risques, en estimant que certaines choses sont bien plus dangereuses qu'elles ne le sont véritablement, et d'autres beaucoup moins. Nous vivons dans un présent exagéré – nous accordons trop d'attention à nos expériences récentes, et trop peu au passé, en nous concentrant sur les évènements actuels plutôt que sur les comportements à long terme. Nous occultons l'avenir à un point qui n'a aucun sens économique ou écologique. Nous n'attribuons pas aux signaux que nous recevons le poids qu'ils méritent. Nous sommes imperméables aux nouvelles qui nous déplaisent ou aux informations qui ne cadrent pas avec nos modèles mentaux. Autrement dit, nous ne prenons même pas les décisions optimales pour notre propre intérêt, sans parler de celui du système dans son ensemble.

Quand la théorie de la rationalité limitée a remis en question 200 ans d'économie issue des enseignements d'Adam Smith, vous imaginez la controverse qui s'est ensuivie – et qui est loin d'être résolue. La théorie héritée de l'économiste écossais supposait premièrement qu'*homo economicus* agit de manière parfaitement optimale sur la base d'informations complètes, et deuxièmement que lorsque de nombreux représentants de l'espèce *homo economicus* font de même, leurs actions cumulées conduisent au meilleur résultat possible pour chacun.

Aucun de ces deux postulats ne résiste longtemps à l'épreuve du réel. Au chapitre suivant consacré aux pièges et aux opportunités, je décrirai certaines des structures les plus courantes qui peuvent mener au désastre par le biais de la rationalité limitée. Elles incluent des phénomènes connus tels que l'addiction, la résistance aux politiques, la course aux armements, la dérive des performances et la tragédie des communs. Ici, je me contenterai de mentionner la plus grosse surprise qui peut survenir si l'on fait l'impasse sur la rationalité limitée.

Supposons que pour une raison ou une autre, vous soyez extrait de votre position habituelle dans la société et mis à la place d'une personne dont vous n'avez jamais compris le comportement. Ayant critiqué le gouvernement de longue date, vous en faites soudain partie. Ayant toujours été un ouvrier opposé à la direction, vous

devenez cadre (ou *vice versa*). Ou encore, ayant été un militant environnemental des plus critiques envers les grandes entreprises, vous vous retrouvez à prendre des décisions environnementales pour l'une d'elles. Si seulement ce type de renversement pouvait se produire beaucoup plus souvent, dans toutes les directions, afin d'élargir les horizons de chacun !

Dans votre nouvelle position, vous expérimentez les flux d'informations, les incitations et dissuasions, les objectifs et divergences, les pressions – la rationalité limitée – qui vont avec ce statut. Il se peut qu'en vous rappelant comment vous envisagiez les choses auparavant, vous révolutionniez le système à coups d'innovations, mais c'est tout à fait improbable. Si vous devenez cadre, vous cesserez probablement de voir la main-d'œuvre comme un partenaire méritant de la production, la considérant désormais comme un coût à minimiser. Si vous devenez financier, vous surinvestirez sans doute en période d'expansion pour sous-investir en temps de récession, comme tous les autres spéculateurs. Si vous vous retrouvez dans la misère, vous verrez la rationalité à court terme, l'espoir, l'opportunité, la nécessité d'avoir de nombreux enfants. Si vous vous retrouvez pêcheur avec un crédit sur votre bateau, une famille à nourrir et une connaissance imparfaite de l'état de la ressource halieutique, vous pratiquerez la surpêche.

Nous enseignons ce phénomène sous forme de jeux de rôle. Les étudiants sont placés dans des situations où ils expérimentent les flux partiels d'informations que perçoivent les différents acteurs d'un système réel. En tant que pêcheurs fictifs, ils surpêchent. En tant que ministres de nations en développement, ils privilégient les intérêts de leurs industries par rapport aux besoins de leur peuple. En tant que membres des classes aisées, ils servent leurs propres intérêts ; appartenant à la classe inférieure, ils deviennent apathiques ou rebelles. Et vous feriez de même. Lors de la célèbre expérience sur l'univers carcéral qu'a menée le psychologue Philip Zimbardo à Stanford, les participants ont même adopté, en un temps extraordinairement court, les attitudes et les comportements des gardiens et des prisonniers[12].

Le fait de savoir que les choix individuels sont rationnels dans la limite des informations disponibles ne doit pas être utilisé pour excuser les comportements qui témoignent d'un esprit étroit. Cela permet de comprendre pourquoi ce comportement advient. Dans les limites de ce qu'une personne située dans cette partie du système peut voir et savoir, ce comportement est raisonnable. Retirer un individu de sa position de rationalité limitée et le remplacer par un autre ne fera sans doute pas une grande différence. Blâmer l'individu contribue rarement à parvenir à un résultat plus désirable.

Pour que les choses changent, il faut avant tout s'extraire des informations limitées qui peuvent être perçues depuis un seul point du système afin d'avoir une vue d'ensemble. Un point de vue élargi permet de restructurer les flux d'informations, les objectifs, les incitations et les dissuasions de manière à ce que les différentes actions rationnelles limitées aboutissent aux résultats souhaités par chacun.

Il est étonnant de voir à quel point les changements de comportement surviennent aisément et rapidement ne serait-ce qu'en étendant légèrement la rationalité limitée grâce à des informations plus appropriées, plus complètes et procurées à un moment plus opportun.

INTERLUDE

Des compteurs électriques de maisons individuelles aux Pays-Bas

Dans une banlieue d'Amsterdam se trouve un lotissement de maisons individuelles qui ont toutes été construites en même temps et sont toutes identiques. Enfin… quasiment identiques. Pour des raisons mystérieuses, dans certaines maisons le compteur électrique a été installé au sous-sol, et dans d'autres il a été posé dans le hall d'entrée.

Ces compteurs sont dotés d'un hublot en verre protégeant un petit disque métallique horizontal. Plus la famille consomme d'électricité à un moment donné, plus le disque tourne vite tandis qu'un afficheur comptabilise les kilowattheures.

> Lors de la première crise pétrolière, au début des années 1970, les Hollandais se sont mis à surveiller de près leur consommation d'énergie. Or il s'est avéré que dans ce quartier, certaines maisons utilisaient un tiers d'électricité en moins par rapport aux autres. Personne n'y trouvait d'explication. Toutes les familles étaient comparables et bénéficiaient du même tarif.
> En définitive, on s'est aperçu que la différence résidait dans l'emplacement du compteur. Les familles consommant davantage d'électricité étaient celles dont le compteur se trouvait au sous-sol, que les habitants voyaient rarement. Et les autres avaient leur compteur dans l'entrée où les habitants passaient plusieurs fois par jour devant le disque qui tournait en allongeant d'autant la facture d'électricité mensuelle[13].

Certains systèmes sont dotés d'une structure qui leur permet de fonctionner correctement malgré la rationalité limitée. Une rétroaction adéquate intervient au bon endroit au bon moment. En temps normal, votre foie reçoit juste les informations dont il a besoin pour faire son travail. Au sein d'un écosystème non perturbé ou d'une culture traditionnelle, la personne, l'espèce ou la population, livrée à elle-même, se comporte de manière à servir et stabiliser l'ensemble. De tels systèmes s'autorégulent. Ils ne génèrent aucun problème. Ils ne mobilisent aucune agence gouvernementale et ne sont pas soumis à des dizaines de politiques vouées à l'échec.

Depuis Adam Smith, on admet largement que le marché de libre concurrence est l'un de ces systèmes autorégulateurs convenablement structurés. À certains égards, il l'est. Sous d'autres aspects flagrants pour qui veut les voir, il ne l'est pas. Un marché libre permet aux producteurs et aux consommateurs, qui disposent des meilleures informations sur les opportunités de production et les choix de consommation, de prendre des décisions relativement autonomes et localement rationnelles. Mais ces décisions ne sauraient corriger par elles-mêmes la tendance générale du système à générer des monopoles et des effets indésirables (externalités), à exercer une discrimination envers les pauvres ou à dépasser sa capacité de charge soutenable.

Pour paraphraser une prière commune : Seigneur, accorde-nous la sérénité nécessaire pour exercer librement notre rationalité limitée au sein des systèmes qui sont structurés de manière appropriée, le courage de restructurer ceux qui ne le sont pas, et la sagesse de les distinguer les uns des autres !

La rationalité limitée de chaque acteur d'un système – déterminée par les informations, incitations, dissuasions, objectifs, pressions et contraintes auxquels il est soumis – pourra conduire ou non à des décisions contribuant au bien-être du système dans son ensemble. Dans la négative, l'apport de nouveaux acteurs dans le même système n'améliorera pas les performances de celui-ci. Pour changer la donne, il faudra reconfigurer le système en améliorant les informations, incitations, dissuasions, objectifs, pressions et contraintes influant sur des acteurs spécifiques.

> **Il se peut que la rationalité limitée de chaque acteur d'un système n'entraîne pas des décisions contribuant au bien-être du système dans son ensemble.**

5.
Pièges et opportunités des systèmes

> « Les élites rationnelles […] savent tout ce qu'elles peuvent connaître de leurs mondes techniques ou scientifiques restreints, mais il leur manque une perspective plus large. De l'idéologue marxiste au penseur jésuite, du diplômé de Harvard à l'officier d'état-major […], tous ont une préoccupation commune : faire en sorte que leur système particulier fonctionne.
> Pendant ce temps […], la civilisation devient de plus en plus incompréhensible et dépourvue d'orientation. »
> *John Ralston Saul, philosophe politique*[1]

Les délais, les non-linéarités, l'absence de limites claires et autres propriétés des systèmes qui nous surprennent se retrouvent à peu près dans tout système. Le monde est non linéaire. Tenter de le rendre linéaire à des fins mathématiques ou administratives est généralement une mauvaise idée lorsque c'est faisable, ce qui est rarement le cas. Les limites sont liées à un problème, elles sont évanescentes et désordonnées ; en outre, elles sont nécessaires à l'organisation et à la clarification. Afin d'être moins surpris par les systèmes complexes, il convient surtout d'apprendre à anticiper, à apprécier et à utiliser la complexité du monde.

Toutefois, certains systèmes sont plus que surprenants ; ils sont pervers. En raison de leur structure, ils génèrent des comportements vraiment problématiques qui nous causent de gros ennuis. Ces

désagréments systémiques prennent de nombreuses formes ; certains sont uniques, mais la plupart sont extrêmement communs. Nous qualifions d'**archétypes** les structures systémiques qui produisent ces comportements problématiques répandus. Parmi ces comportements figurent l'addiction, la dérive des performances et l'escalade. Ils sont tellement courants que nous n'avons eu aucun mal à trouver, en une seule semaine de parution de l'*International Herald Tribune*, assez d'exemples pour illustrer chacun des archétypes décrits dans ce chapitre.

Il ne suffit pas de comprendre les structures archétypales générant des problèmes. Il est impossible de faire avec. Il faut les modifier. La destruction qu'elles occasionnent est souvent attribuée à des acteurs ou évènements particuliers, alors qu'elle résulte de la structure du système. Blâmer, discipliner, licencier, mettre en œuvre des leviers d'action, espérer une succession d'évènements déterminants plus favorables, recourir à des solutions marginales : ces réponses standards ne remédieront pas aux problèmes structurels. Voilà pourquoi je qualifie ces archétypes de « pièges ».

Mais il est possible d'éviter les pièges systémiques. Pour cela, il faut les repérer à l'avance afin de ne pas s'y laisser prendre, ou bien reconfigurer la structure du système – en reformulant les objectifs, en réduisant, renforçant ou modifiant les boucles de rétroaction, en ajoutant de nouvelles rétroactions. Voilà pourquoi je ne qualifie pas seulement ces archétypes de pièges, mais également d'opportunités.

La résistance aux politiques : des solutions qui échouent

« "Je pense que le crédit d'impôt à l'investissement a montré son efficacité pour relancer l'économie", a déclaré Joseph W. Duncan, économiste en chef chez Dun & Bradstreet. [...]

Or, selon ses nombreux contradicteurs, nul n'a été capable de démontrer le moindre bienfait pour la croissance économique des

crédits à l'investissement qui ont été accordés, modifiés et supprimés à maintes reprises au cours des 30 dernières années. »
John H. Cushman, Jr, International Herald Tribune, *1992*[2]

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, le principal symptôme d'une structure à boucle régulatrice est que le système change à peine en dépit des forces extérieures subies. Les boucles de rétroaction régulatrices stabilisent un système ; le schéma comportemental perdure. Ce type de structure est idéal si vous avez pour objectif de maintenir la température de votre corps à 37 °C. Toutefois, certains comportements persistants sont indésirables. Malgré les tentatives d'élaboration de solutions technologiques ou politiques, le système semble irrémédiablement figé, reproduisant chaque année le même comportement. Tel est le piège systémique des « solutions qui échouent » ou de la « résistance aux politiques ». On l'observe lorsque les politiques agricoles s'efforcent chaque année de réduire les excédents, mais que la surproduction persiste. On a beau faire la guerre aux stupéfiants, la drogue est aussi présente qu'auparavant. Il n'y a guère de preuve d'efficacité des crédits d'impôt à l'investissement ni de nombreuses autres politiques destinées à stimuler celui-ci lorsque le marché ne récompense pas les investisseurs. Aucune politique n'a encore été capable de réduire le coût des services de santé aux États-Unis. Des décennies de « création d'emplois » ne sont pas parvenues à maintenir le chômage à un faible niveau. Vous pourrez sans doute mentionner une dizaine d'autres domaines dans lesquels des efforts acharnés entraînent invariablement des résultats nuls.

La résistance aux politiques provient de la rationalité limitée des acteurs du système, chacun ayant ses propres objectifs. Chaque acteur surveille l'état du système au travers du prisme d'une variable importante – revenu, prix, logement, drogue ou investissement – et compare cet état avec son objectif. S'il observe un écart, l'acteur prend une mesure pour rectifier la situation. En général, plus l'écart entre l'objectif et l'état actuel est important, plus l'action entreprise sera de grande envergure.

Cette résistance au changement survient lorsque les objectifs des sous-systèmes se distinguent et s'opposent les uns aux autres. Imaginez un système à stock unique – l'approvisionnement en drogue dans les rues d'une ville, par exemple – dont les différents acteurs s'efforcent d'orienter le stock de diverses manières. Les toxicomanes veulent que le stock de stupéfiants reste élevé, les autorités qu'il reste bas, et les dealers cherchent à le maintenir à un niveau intermédiaire afin que les prix ne soient ni trop hauts, ni trop bas. Enfin, l'habitant moyen veut simplement éviter d'être agressé par les toxicomanes qui ont besoin d'argent pour se procurer leur dose. Chaque acteur fait tout son possible pour atteindre son objectif.

Si l'un des acteurs prend l'avantage et modifie le stock du système (l'approvisionnement en drogue) dans un sens (les autorités parviennent à réduire les importations à la frontière), les autres redoublent d'efforts pour rétablir la situation (les prix montent, les toxicomanes commettent davantage de délits pour acheter leur dose quotidienne, les trafiquants font de plus gros bénéfices, les fournisseurs ont des moyens accrus pour s'équiper en avions et en bateaux afin d'échapper aux patrouilles frontalières). À elles toutes, ces ripostes mènent au *statu quo*, le stock évolue à peine, et personne n'obtient ce qu'il recherchait.

Au sein d'un système résistant aux politiques, dont les acteurs poussent dans différentes directions, chacun doit développer beaucoup d'efforts pour maintenir le système à un niveau que personne ne souhaite. Si un seul acteur relâche la pression, les autres rapprocheront le système de leur objectif et l'éloigneront de celui du démissionnaire. Autrement dit, cette structure systémique fonctionne en mode cliquet : l'intensification des efforts de n'importe quel acteur entraîne l'intensification de tous les autres. Or il est difficile de réduire cette intensification. Il faudrait une sacrée dose de confiance mutuelle pour que tous les acteurs disent : « OK, et si nous levions tous le pied pendant un certain temps ? »

La résistance aux mesures politiques a parfois des répercussions tragiques. En 1967, le gouvernement roumain a décidé que son pays avait besoin d'accroître sa population et que pour y parvenir, il fallait interdire aux femmes de moins de 45 ans d'avorter. Aussi a-t-il

soudain rendu l'avortement illégal. Peu de temps après, le taux de natalité a triplé. Puis la résistance de la population roumaine s'est mise en place.

Bien que les contraceptifs et l'avortement aient continué à être prohibés, le taux de natalité est progressivement redescendu, retrouvant presque son niveau antérieur. Or ce résultat a principalement été atteint par le biais d'avortements clandestins dangereux, qui ont multiplié par trois le taux de mortalité maternelle. En outre, un grand nombre d'enfants non désirés nés durant l'interdiction de l'avortement ont été abandonnés. Les familles roumaines étaient trop pauvres pour élever décemment les nombreux enfants que leur gouvernement souhaitait, et elles en avaient conscience. Aussi ont-elles résisté aux mesures gouvernementales visant à accroître la taille des familles, à leur propre détriment et à celui de la génération qui a grandi dans des orphelinats.

Une manière de brider la résistance aux mesures politiques consiste à recourir à la force. Si vous exercez une puissance suffisante et que vous êtes capable de la maintenir, l'approche autoritaire peut fonctionner, au prix d'un ressentiment monumental et d'éventuelles répercussions explosives si la chape est levée. C'est ce qui est arrivé à l'auteur de la politique nataliste roumaine, le dictateur Nicolae Ceausescu, qui a usé et abusé de son pouvoir pour mater la résistance à sa politique. Quand son gouvernement a été renversé, le chef d'État a été exécuté, ainsi que sa famille. La première loi abrogée par le nouveau gouvernement fut celle interdisant l'avortement et la contraception.

L'autre solution pour surmonter la résistance est si contre-intuitive qu'elle est le plus souvent jugée inconcevable. Laisser faire. Abandonner les politiques inefficaces. Faire en sorte que les ressources et l'énergie déployées pour imposer et résister soient employées de manière plus constructive. Vous n'obtiendrez pas ce que vous voulez du système, mais celui-ci n'ira pas aussi loin que vous le craignez dans la mauvaise direction, car la plupart des agissements que vous tentiez de corriger répondaient à vos propres agissements. Si vous relâchez la pression, ceux qui s'opposaient à

vous la relâcheront également. C'est ce qui s'est passé en 1933 quand la prohibition a été abrogée aux États-Unis ; le chaos généré par l'alcool a lui aussi largement disparu.

Ce retour au calme peut être l'occasion d'observer plus attentivement les boucles de rétroaction à l'œuvre au sein du système, de comprendre la rationalité limitée qui les sous-tend et de trouver un moyen pour atteindre les objectifs des participants au système tout en améliorant l'état de ce dernier.

Par exemple, une nation souhaitant accroître son taux de natalité se demandera pourquoi les couples ont peu d'enfants, et elle s'apercevra que ce n'est pas faute d'aimer les gosses. Peut-être sont-ils privés des ressources, de l'espace de vie, du temps ou de la sécurité nécessaires pour avoir davantage d'enfants. À l'époque où la Roumanie interdisait l'avortement, la Hongrie était également préoccupée par son faible taux de natalité, craignant un déclin économique par manque de main-d'œuvre. Le gouvernement hongrois ayant compris que l'exiguïté des logements expliquait en partie la taille réduite des familles, il a décidé d'attribuer des appartements plus grands aux foyers plus nombreux. Cette politique n'a été que partiellement couronnée de succès car le logement n'était pas le seul problème. Cependant, elle s'est avérée bien plus efficace que celle adoptée par la Roumanie, évitant en outre les résultats désastreux de cette dernière[3].

Le meilleur moyen de contrer la résistance aux politiques est de faire en sorte d'aligner les différents objectifs des sous-systèmes, en général en fixant un objectif global qui permet à tous les acteurs de sortir de leur rationalité limitée. Si chacun d'eux opère harmonieusement dans le même but (si toutes les boucles de rétroaction servent le même objectif), les résultats peuvent être fabuleux. Les exemples les plus connus de cette harmonisation des objectifs sont la mobilisation économique en temps de guerre, ou la reconstruction après une guerre ou une catastrophe naturelle.

Un autre exemple réside dans la politique démographique de la Suède. Au cours des années 1930, son taux de natalité a diminué brusquement, ce qui a inquiété le gouvernement. Mais contrairement à la Roumanie et à la Hongrie quelques décennies plus tard,

l'exécutif suédois a examiné ses objectifs et ceux de la population, et en a conclu qu'un terrain d'entente pouvait être trouvé non pas quant à la taille de la famille, mais quant à la qualité de la prise en charge des enfants. Chacun d'eux devait être désiré et éduqué. Aucun enfant ne devait se retrouver dans le besoin matériel. Chacun devait avoir accès à une éducation et à des services de santé d'excellente qualité. Tels étaient les objectifs sur lesquels le gouvernement et la population pouvaient s'accorder.

Les mesures politiques qui en ont résulté semblaient contradictoires en période de faible natalité, car elles incluaient la gratuité de la contraception et de l'avortement – du fait du principe selon lequel tout enfant devait être désiré. Elles comprenaient également la généralisation de l'éducation sexuelle, la simplification des procédures de divorce, la gratuité des soins obstétricaux, l'aide aux familles dans le besoin, ainsi qu'une augmentation conséquente des investissements dans l'éducation et les services de santé[4]. Depuis, le taux de natalité est monté et descendu à plusieurs reprises sans entraîner de panique dans un sens ou dans l'autre, car la nation se concentre sur un objectif bien plus important que le nombre de Suédois.

L'harmonisation des objectifs au sein d'un système n'est pas toujours possible, mais elle vaut la peine d'être recherchée. On ne pourra l'atteindre qu'en abandonnant les objectifs plus restreints et en envisageant le bien-être à long terme de l'ensemble du système.

PIÈGE : LA RÉSISTANCE AUX POLITIQUES

Quand divers acteurs s'efforcent d'influer sur le stock d'un système en fonction d'objectifs divers, il peut en résulter une résistance aux mesures prises. Toute nouvelle mesure, notamment si elle est efficace, ne fait qu'éloigner davantage le stock d'un système des objectifs des autres acteurs tout en générant une résistance supplémentaire, pour aboutir à un résultat qui ne plaît à personne, mais que chacun s'escrime à maintenir en déployant des efforts considérables.

PARADE

Laissez faire. Rassemblez tous les acteurs et utilisez l'énergie auparavant consacrée à la résistance pour rechercher des solutions mutuellement satisfaisantes afin que tous les objectifs soient atteints – ou pour redéfinir des objectifs plus globaux et importants vers lesquels tout le monde puisse tendre simultanément.

La tragédie des communs

« La coalition du chancelier Helmut Kohl, menée par l'Union chrétienne-démocrate, s'est mise d'accord la semaine dernière avec les sociaux-démocrates, après des mois de chicaneries, pour mettre un terme à l'afflux de migrants économiques en durcissant les conditions de demande d'asile. »
International Herald Tribune, *1992*[5]

Le piège qualifié de tragédie des communs survient à l'occasion d'une escalade ou d'une simple croissance dans un environnement érodable partagé. Dans un article désormais célèbre, l'écologue

Garrett Hardin a décrit en 1968 le système des biens communs en partant de l'exemple du pâturage :

> « Représentez-vous une prairie ouverte à tous. On peut s'attendre à ce que tous les éleveurs tentent de faire paître le maximum de bétail sur ce pré commun. […] De manière explicite ou implicite, plus ou moins consciemment, il se dit : "Quelle est *pour moi* l'utilité d'ajouter un animal de plus à mon troupeau ?"
> Puisque l'éleveur reçoit tous les bénéfices de la vente de l'animal supplémentaire, l'utilité positive est presque de +1. […] Cependant, puisque les effets du surpâturage sont partagés par tous les éleveurs, l'utilité négative pour chaque éleveur prenant une décision particulière n'est qu'une fraction de – 1. […]
> L'éleveur rationnel conclut que le seul choix sensé est pour lui d'ajouter un animal à son troupeau. Puis un autre, puis un autre encore… Mais c'est là une conclusion à laquelle parviennent tous les éleveurs rationnels qui partagent le pré commun. En cela réside la tragédie. Chacun est prisonnier d'un système qui l'oblige à augmenter son troupeau sans limites, dans un monde limité. Tous courent donc à la ruine, chacun poursuivant son intérêt personnel[6]. »

La rationalité limitée, en somme !

Dans tout système de bien commun, il y a en premier lieu une ressource partagée (le pâturage). Pour que ce système soit sujet à la tragédie, la ressource doit non seulement être limitée, mais susceptible d'être érodée en cas de surexploitation. Autrement dit, au-delà d'un certain seuil, moins il y a de ressource, moins celle-ci est capable de se régénérer, ou plus elle risque d'être détruite. Quand l'herbe devient rare sur le pré, les vaches la broutent jusqu'à la base. Les racines ne retenant plus le sol, ce dernier est lessivé par les

pluies. Moins il y a de terre, moins l'herbe pousse. Et ainsi de suite. Encore une boucle de rétroaction amplificatrice qui part à vau-l'eau.

Un système de bien commun a également besoin d'utilisateurs de la ressource (les vaches et leurs propriétaires), lesquels ont de bonnes raisons de s'accroître et le font à un rythme *qui n'est pas influencé par l'état du bien commun*. Chaque éleveur n'a aucune raison, aucune incitation, aucun signal fort en retour pour que l'éventualité du surpâturage l'empêche d'ajouter une autre vache au pré commun. Au contraire, il a tout à y gagner.

Le migrant plein d'espoir n'attend que des bienfaits des généreuses lois allemandes sur l'asile. Il n'a aucune raison d'envisager le fait qu'une immigration trop importante conduira inévitablement l'Allemagne à durcir sa législation. D'ailleurs, le fait de savoir qu'elle est en train d'en débattre l'incitera à se presser d'y entrer !

La tragédie des communs naît d'un *défaut (ou d'un retard excessif) de rétroaction* de la ressource vers la croissance de ses utilisateurs.

Plus il y a d'utilisateurs, plus la ressource est utilisée. Plus la ressource est utilisée, moins il y en a pour chaque utilisateur. Si les utilisateurs suivent la rationalité limitée des communs (« Pourquoi serait-ce à *moi* de limiter la taille de mon troupeau ? »), il n'y a aucune raison pour que l'un d'entre eux réduise son utilisation. Finalement, le taux de pâturage excèdera la capacité de la ressource à fournir de l'herbe. En l'absence de rétroaction vers l'utilisateur, le surpâturage continuera. La ressource s'épuisera. Puis la boucle d'érosion entrera en lice, la ressource sera détruite et tous les utilisateurs seront ruinés.

Vous penserez sans doute qu'aucun groupe humain ne serait assez fou pour détruire ses biens communs. Mais voyez ces quelques exemples courants de ressources partagées qui courent au désastre ou l'ont déjà atteint :

• L'accès illimité à un parc national renommé peut entraîner une telle fréquentation que les beautés naturelles du site soient détruites ;

• Chacun trouve un avantage immédiat à continuer à utiliser des combustibles fossiles alors que le dioxyde de carbone émis est un

gaz à effet de serre qui entraîne le changement climatique de toute la planète ;

• Si chaque famille peut avoir autant d'enfants qu'elle le souhaite, mais que la société dans son ensemble doit supporter le coût de l'éducation, des services de santé et de la protection environnementale pour tous, le nombre de naissances risque d'excéder la capacité de la société à les prendre en charge. (C'est l'exemple qui a incité Hardin à rédiger son article.)

Ces exemples ont trait à la surexploitation de ressources renouvelables – structure que vous avez déjà rencontrée dans le zoo des systèmes. La tragédie peut se tapir non seulement dans l'utilisation de ressources communes, mais dans celle de puits communs où les polluants sont rejetés. Une famille, une entreprise ou une nation peut aisément réduire ses coûts, augmenter ses profits ou croître plus vite si l'ensemble de la communauté se charge d'absorber ou de traiter ses déchets. Elle en tire un avantage considérable, tout en ne supportant qu'une fraction de sa propre pollution (voire aucune si elle la rejette en aval ou dans l'atmosphère). Il n'y a aucune raison rationnelle pour qu'un pollueur cesse de polluer. Dans ces cas de figure, la rétroaction qui influe sur le taux d'utilisation de la ressource commune – que ce soit une source ou un puits – est faible.

Si vous pensez que le raisonnement d'un exploiteur de biens communs est difficilement compréhensible, demandez-vous à quel point vous seriez prêt à pratiquer le covoiturage pour réduire la pollution atmosphérique, ou à nettoyer derrière vous après avoir sali un lieu public. La structure d'un système de ressource commune rend les comportements égoïstes bien plus commodes et profitables que les comportements responsables envers l'ensemble de la communauté et l'avenir.

Il y a trois moyens d'éviter la tragédie des communs :

• *Sensibiliser et exhorter.* Aider les gens à voir les conséquences d'une utilisation effrénée des ressources communes. Faire appel à leur moralité. Les inciter à la modération. Menacer les transgresseurs de réprobation sociale ou des flammes éternelles de l'enfer.

• *Privatiser les biens communs.* Les diviser de manière à ce que chacun récolte les conséquences de ses propres actions. Les personnes incapables de se maîtriser pour rester en deçà de la capacité de charge de leur ressource privée ne nuiront qu'à elles-mêmes.

• *Réguler les biens communs.* Garrett Hardin qualifie sans ambages cette option de « coercition mutuelle par consentement mutuel ». La régulation peut prendre diverses formes, de l'interdiction catégorique de certains comportements aux quotas, en passant par les permis, taxes et incitations. Pour qu'elle soit efficace, la régulation doit être assortie de contrôles et de pénalités.

La première solution, l'exhortation, vise à maintenir l'utilisation des communs à un niveau suffisamment bas par le biais de la pression morale, afin d'éviter que la ressource ne soit menacée. La deuxième, la privatisation, introduit un lien direct de rétroaction entre l'état de la ressource et ses utilisateurs en faisant en sorte que les gains et les pertes retombent sur la personne qui prend les décisions. Le propriétaire pourra toujours abuser de la ressource, mais il faudra pour cela qu'il soit ignorant ou irrationnel. Enfin, la troisième solution, la régulation, instaure un lien indirect de rétroaction entre l'état de la ressource et ses utilisateurs. Pour que cette rétroaction fonctionne, les régulateurs doivent être capables de surveiller et d'interpréter correctement l'état des biens communs, disposer de véritables moyens de dissuasion, et avoir à cœur le bien de l'ensemble de la communauté. (Ils ne doivent pas être mal informés, faibles ou corrompus.)

Certaines cultures « primitives » ont géré efficacement leurs ressources communes pendant des générations grâce à la sensibilisation et l'exhortation. Toutefois, Garrett Hardin juge cette solution peu fiable car des biens communs protégés uniquement par la tradition ou un « système d'honneur » pourraient attirer des personnes qui n'ont aucun respect pour les traditions ou sont dépourvues d'honneur.

La privatisation est plus fiable que l'exhortation si la société est prête à laisser certaines personnes apprendre à leurs propres dépens. Cependant, de nombreuses ressources telles que l'atmosphère ou les

produits de la mer sont impossibles à privatiser. Ce qui ne laisse plus que l'option de la « coercition mutuelle par consentement mutuel ».

La vie regorge d'arrangements de coercition mutuelle, dont la plupart sont si ordinaires que vous n'y pensez même pas. Chacun d'eux restreint votre liberté d'abuser d'un bien commun, tout en préservant votre liberté de l'utiliser. En voici quelques exemples :

• Un carrefour très fréquenté est régulé par des feux tricolores. Vous n'avez pas le droit de le franchir n'importe quand. Mais quand c'est votre tour, vous pouvez le traverser en bénéficiant d'une sécurité dont vous auriez été privé si l'accès n'avait pas été règlementé.

• En centre-ville, l'utilisation des places de stationnement est répartie grâce à des parcmètres qui en facturent l'occupation et limitent sa durée. Vous n'êtes pas libre de vous garer où bon vous semble aussi longtemps que vous le voulez, mais vous avez plus de chances de trouver une place que si les parcmètres n'existaient pas.

• Vous ne pouvez pas vous servir à volonté dans les caisses de la banque, malgré tous les avantages que cela pourrait vous procurer. Des équipements de protection tels que les coffres-forts, complétés par la police et les prisons, vous empêchent de traiter la banque comme une ressource commune. En contrepartie, votre propre argent est en sécurité sur votre compte.

• Pour diffuser des émissions de radio ou de télévision, vous devez obtenir l'autorisation d'une instance de régulation. Si votre liberté d'émission n'était pas limitée, les fréquences radioélectriques seraient un véritable chaos de signaux qui empièteraient les uns sur les autres.

• De nombreux systèmes municipaux de gestion des déchets sont devenus si coûteux que les foyers sont désormais facturés en fonction de la quantité de déchets enlevés – transformant un service commun en un système de tarification à l'usage.

Vous noterez à quel point la « coercition mutuelle par consentement mutuel » peut prendre des formes diverses. Les feux tricolores accordent l'accès au compte-gouttes sur la base du « chacun son tour ». Les parcmètres facturent l'utilisation des places de stationnement public. La banque recourt à des barrières

physiques et à de fortes peines. L'utilisation de bandes de fréquences est accordée par une agence gouvernementale. Et la facturation de l'enlèvement des ordures rétablit la rétroaction manquante, chaque foyer ressentant l'impact économique de sa propre utilisation des communs.

La plupart des gens se plient la plupart du temps aux systèmes de régulation, à partir du moment où ces derniers sont mutuellement acceptés et que leur objectif est compris. Néanmoins, tous les systèmes de régulation doivent recourir aux forces de l'ordre et aux sanctions à l'encontre des personnes non coopératives.

PIÈGE : LA TRAGÉDIE DES COMMUNS

Lorsqu'une ressource est commune, chaque usager bénéficie directement de son utilisation tandis que les coûts de son exploitation abusive sont partagés entre tous. Par conséquent, il y a une très faible rétroaction de l'état de la ressource sur les décisions prises par ses utilisateurs.
S'ensuit la surexploitation de la ressource qui s'érode jusqu'à ne plus être disponible pour personne.

PARADE

Sensibilisez et exhortez les utilisateurs afin qu'ils prennent conscience des répercussions de la surexploitation de la ressource. En outre, restaurez ou renforcez le lien de rétroaction soit en privatisant la ressource afin que chaque utilisateur ressente les conséquences directes de ses abus, soit (sachant que de nombreuses ressources ne peuvent être privatisées) en régulant l'accès de tous à la ressource.

La dérive des performances

> « Au cours de cette récession, les Britanniques ont découvert que […] l'économie est plus que jamais sur la mauvaise pente.
> Les catastrophes nationales elles-mêmes sont désormais perçues comme les présages d'un déclin supplémentaire. Dimanche, l'*Independent* a consacré un article en première page au "sinistre pressentiment selon lequel l'incendie du château de Windsor serait symptomatique du pays dans son ensemble, qu'il découlerait de la nouvelle propension nationale à l'incompétence […]".
> Lord Peston, porte-parole du Parti travailliste pour l'économie et l'industrie, a déclaré : "Nous savons ce que nous devrions faire, mais pour une raison mystérieuse nous ne le faisons pas."
> Politiciens, hommes d'affaires et économistes reprochent à leur pays d'être un endroit où les jeunes reçoivent une éducation médiocre, où les employés comme les cadres sont sous-qualifiés, où les investissements sont chiches et où les dirigeants politiques conduisent l'économie en dépit du bon sens. »
> *Erik Ipsen,* International Herald Tribune, *1992*[7]

Certains systèmes ne se contentent pas de résister aux politiques et de conserver leur piètre état, mais empirent davantage. Cet archétype peut être qualifié de « dérive des performances ». Quelques exemples en sont la chute de la part de marché d'une entreprise, l'aggravation de la qualité de service d'un hôpital, l'accroissement continu de la pollution des rivières ou de l'air, un embonpoint croissant malgré des régimes périodiques, l'état de l'enseignement secondaire public aux États-Unis – ou mon propre programme de footing qui semble s'être évaporé.

L'acteur d'une telle boucle de rétroaction (le gouvernement britannique, l'entreprise, l'hôpital, la personne corpulente, le principal du collège, la joggeuse) a comme toujours un objectif de

performance ou un état souhaité du système par rapport à l'état réel. S'il existe un écart, une action est entreprise. Jusqu'ici, nous avons affaire à une boucle de rétroaction régulatrice qui devrait maintenir la performance au niveau désiré.

Mais dans ce système, l'état réel se distingue de l'état perçu. *L'acteur tend à croire davantage les mauvaises nouvelles que les bonnes.* Quand les performances réelles varient, il considère les meilleurs résultats comme des aberrations tandis que les moins bons lui restent en mémoire. Il pense que les choses sont pires qu'elles ne le sont véritablement.

Et pour couronner ce tragique archétype, *l'état désiré du système est influencé par l'état perçu*. Les normes n'ont rien d'absolu. Quand la performance perçue diminue, on laisse l'objectif décliner. « Voilà, on ne peut pas espérer mieux. » « Oh, nous ne faisons pas bien pire que l'année dernière. » « Regardez autour de nous, tous les autres sont également en difficulté. »

La boucle régulatrice qui devrait maintenir l'état du système à un niveau acceptable est dépassée par une boucle amplificatrice qui l'attire vers le bas. Plus l'état perçu du système est bas, plus l'état désiré est bas. Plus l'état désiré est bas, moins l'écart est important, moins on entreprend d'action corrective. Plus l'action corrective diminue, plus l'état du système baisse. Si on lui laisse libre cours, cette boucle peut entraîner une dégradation continue des performances du système.

Ce piège systémique peut également être qualifié d'« érosion des objectifs ». On l'appelle aussi « syndrome de la grenouille bouillie », d'après la vieille histoire (j'ignore si elle est vraie) selon laquelle une grenouille plongée soudain dans l'eau chaude s'échappera aussitôt, tandis que si on la met dans l'eau froide qu'on chauffe progressivement, elle y restera tranquillement jusqu'à se laisser bouillir. « Il commence à faire chaud ici. Enfin, guère plus chaud qu'il y a un instant. » La dérive des performances est un processus graduel. Si l'état du système plongeait rapidement, un processus correctif se mettrait précipitamment en place. Mais s'il se dégrade assez lentement pour effacer le souvenir (ou la conviction) d'un passé bien meilleur, chacun s'endort en embrassant des attentes

moins ambitieuses, des efforts plus modestes et des performances plus basses.

Il existe deux antidotes à l'érosion des objectifs. L'un consiste à s'en tenir à des normes absolues, quelles que soient les performances. L'autre à rendre les objectifs sensibles aux *meilleures* performances antérieures, et non aux moins bonnes. Si les performances perçues relèvent d'un biais optimiste et non pessimiste, si l'on considère les meilleurs résultats comme la norme et les moins bons comme un revers temporaire, alors la même structure peut entraîner un système vers des performances toujours meilleures. La boucle amplificatrice négative qui disait « plus les choses vont mal, plus je les laisserai empirer » devient une boucle positive : « plus les choses s'améliorent, plus je travaillerai dur pour qu'elles s'améliorent encore davantage ».

Si j'avais appliqué cette leçon à mon entraînement physique, je participerais désormais à des marathons.

PIÈGE : LA DÉRIVE DES PERFORMANCES

En laissant les performances antérieures influer sur les normes, notamment lorsqu'elles font l'objet d'un biais de perception négative, on introduit une boucle de rétroaction amplificatrice d'érosion des objectifs qui fait dériver le système vers des performances inférieures.

PARADE

Concevez ou modifiez les règles de manière à libérer la créativité non pas dans le sens de leur contournement, mais dans celui de l'atteinte de leur but.

L'escalade

> « Des extrémistes islamiques ont enlevé dimanche un soldat israélien. Ils ont menacé de le tuer à moins que l'armée ne relâche rapidement le fondateur du principal groupe musulman de la bande de Gaza. […] L'enlèvement est survenu dans le cadre d'une flambée de violences, […] trois Palestiniens ayant été tués, et un soldat israélien ayant été abattu depuis un véhicule alors qu'il patrouillait dans sa jeep. En outre, la bande de Gaza a été secouée par des altercations répétées entre des manifestants armés de pierres et les troupes israéliennes qui ont répliqué avec des balles réelles et des projectiles en caoutchouc, blessant au moins 120 personnes. »
> *Clyde Haberman,* International Herald Tribune*, 1992*[8]

J'ai déjà mentionné un exemple d'escalade au début de ce livre : le système des enfants qui se battent. Tu m'as frappé, alors je te frappe un peu plus fort, puis tu ripostes un cran au-dessus, et rapidement c'est un véritable pugilat.

« Je te le rendrai en plus fort », tel est le principe qui entraîne l'escalade. La surenchère résulte d'une boucle amplificatrice instaurée par des acteurs en concurrence qui s'efforcent chacun d'avoir le dessus. L'objectif d'une partie du système ou d'un acteur n'est pas absolu, à l'instar de la température d'une chambre dont le thermostat est réglé sur 18 °C, mais il est lié à l'état d'une autre partie du système, d'un autre acteur. Comme la plupart des pièges systémiques, l'escalade n'est pas nécessairement une mauvaise chose. Si la compétition porte sur un objectif désirable tel qu'un ordinateur plus efficace ou un traitement contre le sida, elle peut activer l'ensemble du système pour qu'il atteigne plus vite le but recherché. Mais si elle fait grimper l'hostilité, l'armement, le bruit ou l'irritation, le piège est insidieux. Les exemples les plus courants et terribles sont les courses aux armements et ces régions du monde où des ennemis jurés vivent en permanence au bord de la violence auto-amplificatrice.

Chaque acteur tire son état désiré de l'état du système perçu par son adversaire – et le hausse d'un cran ! L'escalade ne consiste pas seulement à égaler les voisins, mais à toujours rester légèrement au-dessus. Des années durant, les États-Unis et l'Union soviétique ont exagéré l'importance des armements de l'adversaire afin de justifier un accroissement de leurs propres stocks. À chaque augmentation d'un côté, l'autre bloc s'empressait de surpasser son ennemi. Même si chacun prétendait que l'autre était responsable de cette escalade, il serait plus systémique de dire que chaque pays générait sa propre escalade – son propre développement d'armements initiant un processus qui nécessiterait immanquablement la mise au point d'autres armes à l'avenir. Ce système a entraîné des billions de dollars de dépenses, la dégradation des économies des deux superpuissances et la conception d'armes inimaginablement destructives qui menacent encore le monde aujourd'hui.

La diffamation en période électorale constitue un autre exemple d'escalade perverse. Un candidat traîne un concurrent dans la boue, celui-ci calomnie son adversaire en retour, et ainsi de suite jusqu'à ce que les électeurs ne voient plus le moindre aspect positif chez aucun des candidats, si bien que l'ensemble du processus démocratique s'en trouve discrédité.

Vient ensuite la guerre des prix, lorsqu'une entreprise fixe un prix inférieur à un concurrent, lequel abaisse le sien, incitant la première à réduire encore son tarif, jusqu'à ce que les deux rivales perdent de l'argent sans pouvoir faire machine arrière. Ce type d'escalade peut aboutir à la faillite de l'un des concurrents.

Les agences de publicité pratiquent également l'escalade en sollicitant l'attention du consommateur. Une agence lance une campagne éclatante, tonitruante et bluffante. Sa concurrente réplique avec une campagne encore plus tapageuse, grandiose et hardie. La première surenchérit. Aussi la publicité devient-elle de plus en plus omniprésente (par courrier, par téléphone), criarde, bruyante et intrusive au point d'engourdir les sens du consommateur, si bien que les messages des publicitaires n'ont quasiment plus d'impact.

Le phénomène d'escalade génère également l'amplification du niveau sonore des conversations lors de cocktails, de la longueur des

limousines et des attitudes provocantes des groupes de rock.

L'escalade peut aussi porter sur la tranquillité, la courtoisie, l'efficacité, la discrétion ou la qualité. Cependant, renchérir dans le bon sens peut aussi poser problème car il est difficile de s'arrêter. Un hôpital s'efforçant de surpasser les autres avec des équipements de diagnostic modernes, puissants et coûteux risque de faire exploser les budgets de santé. Une surenchère de moralité peut déboucher sur un puritanisme outrancier. Dans le domaine de l'art, l'escalade peut aller du baroque au rococo, voire au kitsch. En matière d'environnement, un mode de vie responsable peut mener à un rigorisme excessif.

En tant que boucle de rétroaction amplificatrice, l'escalade progresse exponentiellement. Elle peut donc pousser une compétition à l'extrême plus rapidement que quiconque ne l'imaginerait possible. Si rien n'est fait pour interrompre la boucle, le processus s'arrête en général lorsque l'un des concurrents s'effondre, ou les deux.

Pour sortir de l'engrenage, une solution réside dans le désarmement unilatéral – en réduisant délibérément l'état de votre propre système afin d'entraîner la réduction de celui de votre concurrent. Étant donné la logique du système, cette option est quasi inenvisageable. Mais elle peut fonctionner si vous agissez avec détermination, et si vous avez la possibilité de survivre à l'avantage à court terme dont bénéficiera votre concurrent.

Le seul autre moyen élégant d'échapper au système d'escalade consiste à négocier un désarmement. Il s'agit d'un changement structurel, un exercice de reconfiguration systémique. Cela consiste à créer un nouvel ensemble de boucles de contrôle régulatrices afin de maintenir la compétition dans certaines limites (pression parentale pour que les enfants cessent de se bagarrer, réglementations sur la taille et l'emplacement des publicités, forces de maintien de la paix dans les zones sujettes aux violences). Les accords de désarmement sont généralement difficiles à obtenir dans un système d'escalade, et ne sont jamais très agréables pour les parties impliquées, mais ils sont préférables à la poursuite du conflit.

PIÈGE : L'ESCALADE

Quand l'état d'un stock est déterminé par la tentative de surpasser l'état d'un autre stock – et *vice versa* –, une boucle de rétroaction amplificatrice entraîne le système dans une course aux armements, une course à la richesse, une campagne de dénigrement, un vacarme croissant, une surenchère de violence. L'escalade étant exponentielle, elle est susceptible de parvenir à des extrêmes dans un délai étonnamment court. Si rien n'est fait, la spirale sera interrompue par l'effondrement d'un acteur – car une croissance exponentielle ne peut se poursuivre indéfiniment.

PARADE

Le meilleur moyen d'éviter ce piège est de ne jamais y entrer. Si vous êtes pris dans un système d'escalade, vous pouvez refuser de vous battre (désarmement unilatéral) afin d'interrompre la boucle amplificatrice.
Ou vous pouvez négocier l'adoption d'un nouveau système pourvu de boucles régulatrices destinées à contrôler l'escalade.

Le succès va au succès : l'exclusion compétitive

« Les gens extrêmement riches – les 1 % de contribuables situés dans le haut du panier – disposent d'une flexibilité considérable pour réduire l'exposition de leurs revenus à l'impôt. […]
Ceux qui le peuvent se sont empressés de toucher leurs primes au lieu d'attendre l'année prochaine [s'attendant à ce que l'imposition augmente], de liquider leurs stock-options […] et d'anticiper leurs entrées d'argent par tous les moyens. »

Sylvia Nasar, International Herald Tribune, *1992*[9]

L'utilisation d'une richesse accumulée, d'avantages, d'accès privilégiés ou d'informations d'initiés pour générer davantage de richesse, d'avantages, de privilèges ou d'informations illustre l'archétype du « succès qui va au succès ». Ce piège systémique apparaît lorsque les vainqueurs d'une compétition reçoivent, en tant que partie de leur récompense, les moyens de rivaliser plus efficacement encore à l'avenir. Il s'agit d'une boucle de rétroaction amplificatrice qui divise rapidement le système en gagnants qui continuent à gagner et en perdants qui continuent à perdre.

Quiconque a déjà joué au Monopoly connaît le système de la richesse qui génère la richesse. Au départ, tous les joueurs sont à égalité. Ceux qui parviennent les premiers à construire des « hôtels » sur leurs terrains perçoivent des « loyers » auprès des autres joueurs – qu'ils utilisent ensuite pour acheter d'autres hôtels. Plus vous détenez d'hôtels, plus vous pouvez en acquérir. Le jeu se termine lorsqu'un des joueurs possède tout, à moins que les autres aient abandonné depuis longtemps par frustration.

Dans notre quartier, un concours d'illuminations de Noël a été organisé avec une récompense de 100 dollars à la clé. La famille qui l'a remporté la première année s'est servie des 100 dollars pour acheter davantage de décorations lumineuses. Après que cette famille a gagné trois années d'affilée avec des illuminations de plus en plus sophistiquées, le concours a été suspendu.

Car à quiconque a, il sera donné. Plus le gagnant gagnera, plus il pourra gagner à l'avenir. Si cela se passe dans un environnement limité où tous les gains du gagnant sont soutirés aux perdants, ces derniers sont progressivement ruinés, éliminés ou affamés.

Ce phénomène est bien connu dans le domaine de l'écologie où il est qualifié de « principe d'exclusion compétitive ». Selon ce dernier, deux espèces ne peuvent vivre dans la même niche écologique lorsqu'elles se disputent exactement les mêmes ressources. Comme ce sont des espèces différentes, l'une d'elles se reproduira nécessairement plus vite, ou sera capable d'utiliser la ressource plus

efficacement que l'autre. Elle bénéficiera d'une part plus importante de la ressource, ce qui lui permettra de se multiplier davantage et de continuer à profiter. Non seulement elle dominera la niche, mais elle poussera sa rivale à l'extinction. En général, cette éviction ne résultera pas d'une confrontation directe, mais de l'appropriation de la totalité de la ressource au détriment de l'espèce la plus faible.

Une autre manifestation de ce piège a été décrite par Karl Marx dans sa critique du capitalisme. Deux entreprises opérant sur le même marché se comporteront de la même manière que deux espèces se disputant une niche. L'une d'elles obtiendra un léger avantage par le biais d'une efficacité accrue, d'investissements plus avisés, d'une technologie plus avancée ou de pots-de-vin plus conséquents. Grâce à cet avantage, elle aura des revenus plus importants à investir dans des équipements productifs, de nouvelles technologies, de la publicité ou des bakchichs. Sa boucle de rétroaction amplificatrice d'accumulation de capital tournera plus vite que celle de l'entreprise concurrente, ce qui lui permettra de produire encore davantage et de gagner d'autant plus. Si le marché est restreint et qu'aucune loi antitrust n'existe pour arrêter l'entreprise dominante, celle-ci raflera tout à force de réinvestir et d'accroître ses équipements productifs.

Certains pensent que la chute de l'Union soviétique a réfuté les théories du communiste prussien. Mais cette analyse de Marx – selon laquelle la concurrence élimine la concurrence – est démontrée à chaque fois qu'il y a, ou qu'il y a eu, un marché concurrentiel. À cause de la boucle de rétroaction amplificatrice du succès, les nombreux constructeurs automobiles des États-Unis ont été réduits à trois (et non un seul, grâce aux lois antitrust). Dans la plupart des villes américaines, il ne reste plus qu'un journal. Dans toutes les économies de marché, nous voyons le nombre de fermes diminuer à long terme, tandis que la taille des exploitations agricoles restantes augmente.

Le piège de la réussite qui entraîne la réussite occasionne les plus gros dégâts dans les multiples façons dont il enrichit les riches et appauvrit les pauvres. Non seulement les riches ont davantage de moyens pour échapper à l'impôt, mais :

• Dans la plupart des sociétés, les enfants les plus pauvres reçoivent la moins bonne éducation dans les écoles les moins bonnes, s'ils parviennent à y accéder. Dotés de peu de compétences monnayables, ils ne peuvent prétendre qu'à des emplois mal rémunérés, perpétuant ainsi leur pauvreté[10].

• Les personnes ayant de faibles revenus et peu de capital ne peuvent emprunter auprès de la plupart des banques. Par conséquent, soit elles sont dans l'incapacité d'investir pour améliorer leur capital, soit elles s'adressent à des prêteurs locaux qui leur imposent des taux d'intérêt exorbitants. Même lorsque les taux d'intérêt sont raisonnables, ce sont les pauvres qui les paient et les riches qui les perçoivent.

• La terre est répartie si inégalement dans de nombreuses régions du monde que la plupart des agriculteurs louent des parcelles appartenant à d'autres. Ils doivent verser une partie de leurs récoltes au propriétaire pour avoir le privilège de travailler la terre, si bien qu'ils ne pourront jamais acheter leurs propres champs. Et le propriétaire utilise les revenus de ses locations pour acquérir davantage de terres.

Ce sont seulement quelques exemples des rétroactions qui perpétuent la répartition inéquitable des revenus, du capital, de l'éducation et des opportunités. Comme les pauvres n'ont les moyens d'acheter que de petites quantités (de nourriture, de combustible, de semences, d'engrais), ils les paient au prix fort. Comme ils manquent souvent d'organisation et qu'ils s'expriment mal, ils bénéficient d'une part ridiculement faible des sommes allouées par le gouvernement. Les idées et les technologies leur parviennent en dernier. Les maladies et la pollution leur parviennent en premier. Ce sont eux qui n'ont pas d'autre choix que d'accepter des emplois dangereux et mal payés, dont les enfants ne sont pas vaccinés, et qui vivent dans des quartiers surpeuplés sujets à la criminalité et aux catastrophes.

Comment sortir de l'engrenage du succès qui appelle le succès ?

Espèces vivantes et entreprises échappent parfois à l'exclusion compétitive en se *diversifiant*. Une espèce peut apprendre ou évoluer de manière à exploiter de nouvelles ressources. Une entreprise peut

créer un nouveau produit ou service n'entrant pas directement en concurrence avec ceux qui existent déjà. Les marchés tendent vers le monopole et les niches écologiques vers l'uniformité, mais ils génèrent aussi des ramifications de diversité, de nouveaux marchés, de nouvelles espèces qui peuvent avec le temps attirer des concurrents, lesquels poussent à nouveau le système vers l'exclusion compétitive.

Toutefois, la diversification n'est pas garantie, notamment lorsque l'entreprise (ou l'espèce) dominante a le pouvoir d'anéantir tous les rejetons, de racheter toutes les filiales ou de les priver des ressources qui leur permettent de subsister. La stratégie de diversification ne fonctionne pas pour les pauvres.

La boucle amplificatrice du succès peut être maîtrisée par la mise en place de boucles de rétroaction qui empêchent tout concurrent de s'arroger un monopole total. C'est ce que font les lois antitrust en théorie, et parfois en pratique. (Cependant, l'une des ressources que les très grosses entreprises accumuleront à force d'amasser est le pouvoir d'affaiblir la mise en œuvre des lois antitrust.)

La solution la plus évidente pour se soustraire à l'archétype du succès qui va au succès consiste à remettre périodiquement les compteurs à zéro. Les sociétés traditionnelles et les concepteurs de jeux intègrent instinctivement dans leurs systèmes un moyen d'équilibrer les avantages, afin que le jeu reste équitable et intéressant. Au Monopoly, tous les joueurs sont de nouveau à égalité au début de chaque partie, si bien que les perdants de la fois précédente ont une chance de gagner la fois suivante. De nombreux sports imposent des handicaps aux joueurs les plus avantagés. Par ailleurs, bon nombre de sociétés traditionnelles ont leur version du potlatch des Indiens d'Amérique du Nord – rituel par lequel ceux qui possèdent le plus de richesses en cèdent la plupart à ceux qui en ont le moins.

Il existe de nombreux dispositifs pour briser la boucle des riches qui s'enrichissent et des pauvres qui s'appauvrissent : lois fiscales sans transgression possible taxant les riches à des taux supérieurs aux pauvres , œuvres caritatives , assistance publique , syndicats ouvriers , accès universel et équitable à l'éducation et à la santé ,

droits de succession (permettant de remettre les compteurs à zéro à chaque génération). La plupart des sociétés industrielles recourent à une combinaison de régulateurs de ce type pour éviter le piège de la surenchère du succès et faire en sorte que personne ne soit mis hors-jeu. Les cultures du don redistribuent les richesses par le biais du potlatch ou d'autres cérémonies tout en rehaussant le statut social des donateurs.

Ces mécanismes d'égalisation peuvent résulter de la simple moralité ou de la prise de conscience tout à fait pratique selon laquelle les perdants, s'ils n'ont aucun moyen de sortir du match de l'amplification du succès et s'ils n'ont aucun espoir de gagner, risqueraient d'être frustrés au point de saccager le terrain de jeu.

PIÈGE : LE SUCCÈS VA AU SUCCÈS

Lorsqu'on récompense systématiquement les vainqueurs d'une compétition en leur donnant les moyens de gagner à nouveau, une boucle de rétroaction amplificatrice se met en place. Si on laisse libre cours à cette dernière,
les gagnants finiront par tout rafler, et les perdants seront éliminés.

PARADE

La diversification permettant à ceux qui sont en train de perdre de quitter le jeu et d'en commencer un autre ; une stricte limitation de la part du gâteau qu'un gagnant peut emporter (lois antitrust) ; des politiques compensant les inégalités en retirant certains avantages aux joueurs les plus forts ou en procurant des avantages aux plus faibles ; des règles récompensant le succès sans influer sur la partie suivante.

Le transfert du fardeau vers l'intervenant : l'addiction

« Vous aurez une idée de la formidable spirale infernale dans laquelle nous sommes. Parce que des coûts de plus en plus importants sont transférés vers le secteur privé, les entreprises sont de plus en plus nombreuses à cesser d'assurer leurs employés.
[…] Chaque mois, jusqu'à 100 000 Américains perdent désormais leur couverture maladie. Parmi eux, une énorme proportion est éligible au programme public d'assurance maladie Medicaid.
Et comme les États ne peuvent être déficitaires, ils compensent en réduisant leur budget pour l'éducation ou leurs investissements en faveur de l'enfance, ou encore ils augmentent les impôts, si bien qu'il y a moins d'argent pour les autres investissements. »
Bill Clinton, International Herald Tribune, 1992[11]

« Si vous voulez rendre un Somalien furieux, dit-on, retirez-lui son khat. […] Il s'agit des feuilles et des jeunes pousses fraîches du *Catha edulis* […] qui contiennent des substances apparentées à l'amphétamine. Abdukadr Mahmoud Farah, 22 ans, déclare en avoir mâché pour la première fois à l'âge de 15 ans. […]
"C'est pour ne pas penser à cet endroit. Quand j'en prends, je suis heureux. Je peux tout faire. Je ne suis pas fatigué". »
Keith B. Richburg, International Herald Tribune, *1992*[12]

La plupart des gens connaissent les propriétés addictives de l'alcool, du tabac, du café, du sucre et de l'héroïne. Mais tout le monde n'a pas conscience du fait que l'addiction peut se manifester dans le cadre de systèmes plus larges et sous d'autres formes – telles

que la dépendance de l'industrie aux subventions gouvernementales, celle des agriculteurs aux engrais, celle des économies occidentales au pétrole bon marché ou celle des fabricants d'armes aux commandes publiques.

Ce piège est connu sous différentes appellations : addiction, dépendance, transfert du fardeau vers l'intervenant. La structure comprend un stock assorti de flux entrants et de flux sortants. Le stock peut être physique (une récolte de maïs) ou *méta*physique (un sentiment de bien-être ou de confiance en soi). Le niveau du stock est maintenu par un acteur qui ajuste une boucle de rétroaction régulatrice – en modifiant les flux entrants ou sortants. L'acteur a un objectif qu'il compare à sa perception de l'état du stock pour déterminer l'action à entreprendre.

Imaginez que vous êtes un jeune homme vivant dans un pays où sévissent la famine et la guerre. Votre objectif est d'accroître votre impression de bien-être afin de vous sentir heureux, énergique et intrépide. Il y a un gigantesque écart entre votre état réel et celui que vous désirez, et vous avez très peu de solutions à votre disposition pour le combler. Mais une chose que vous pouvez faire est de consommer de la drogue. Celle-ci n'améliorera en rien votre situation – et risque plutôt de l'empirer. Cependant, la drogue modifiera rapidement votre *perception* de votre état, engourdissant vos sens et vous donnant l'impression d'être infatigable et courageux.

De façon similaire, si vous dirigez une entreprise inefficace et que vous obtenez des subventions du gouvernement, vous pouvez continuer à faire de l'argent et à dégager un bon profit, restant ainsi un membre respecté de la société. Ou bien vous êtes un agriculteur qui s'efforce d'accroître sa production de maïs sur une terre surexploitée. En répandant des engrais, vous obtenez une récolte sensationnelle sans rien faire pour améliorer la fertilité du sol.

Le problème est que les états générés par ces interventions ne durent pas. L'euphorie s'estompe. La subvention est dépensée. L'engrais est consommé ou lessivé.

Les exemples de systèmes reposant sur la dépendance et le transfert de fardeau sont légion :

• Autrefois les familles prenaient soin de leurs aînés, ce qui n'était pas toujours facile. Sont alors apparus le programme de prise en charge des personnes âgées par l'État, les foyers-logements, les maisons de retraite. Désormais, la plupart des familles n'ont plus la place, le temps, les compétences ou la volonté de s'occuper de leurs anciens.

• Les transports de marchandises sur de longues distances étaient réalisés par le train, et les déplacements quotidiens des citadins par le métro et le tram jusqu'à ce que le gouvernement décide de financer la construction des autoroutes.

• Les enfants étaient capables de calculer de tête ou avec une feuille et un crayon, jusqu'à ce que les calculatrices se répandent.

• Les populations développaient une immunité partielle contre des maladies comme la variole, la tuberculose ou le paludisme, jusqu'à l'apparition des vaccins et des médicaments.

• De manière générale, la médecine moderne a transféré la responsabilité de la santé depuis les pratiques et modes de vie de chaque individu vers les intervenants que sont les médecins et les médicaments.

Le transfert d'un fardeau vers un intervenant peut s'avérer une bonne chose. Il est souvent réalisé de manière intentionnelle, accroissant parfois la capacité à maintenir le système dans un état désirable. La protection à 100 % conférée par les vaccins contre la variole, si elle est durable, est sans doute préférable à la protection partielle de l'immunisation naturelle. Certains systèmes nécessitent vraiment un intervenant !

Cependant, l'intervention peut devenir un piège systémique. Par exemple, un processus de rétroaction corrective au sein d'un système parvient mal (ou moyennement) à maintenir l'état de ce dernier. Un intervenant efficace et bien intentionné examine le problème et prend les mesures nécessaires pour assumer une partie de la charge. Ainsi conduit-il rapidement le système à l'état souhaité par tout le monde. Les félicitations sont de mise – en général des autocongratulations de l'intervenant.

Puis le problème initial réapparaît car rien n'a été fait pour remédier à sa cause profonde. Si bien que l'intervenant applique à

nouveau sa « solution », en masquant une fois de plus l'état réel du système et donc en n'agissant toujours pas sur le problème. Ce qui rend nécessaire un nouveau recours à la « solution ».

Le piège se forme lorsque l'intervention – que ce soit par destruction active ou par simple négligence – sape la capacité initiale du système à se maintenir. Si cette dernière s'atrophie, une intervention plus importante est nécessaire pour obtenir l'effet désiré. Ce qui réduit encore davantage la capacité du système. L'intervenant sévit de plus belle. Et ainsi de suite.

Pourquoi se laisse-t-on prendre au piège ? Premièrement, l'intervenant ne prévoit pas toujours que son coup de pouce initial risque d'amorcer un enchaînement d'évènements qui conduiront à une dépendance croissante, laquelle finira par laminer la capacité de l'intervenant. Le système de santé américain subit actuellement le laminage de cet enchaînement d'évènements.

Deuxièmement, la personne ou la communauté à laquelle on vient en aide ne réfléchit pas toujours à la perte de contrôle à long terme et à la vulnérabilité accrue qui accompagnent l'opportunité de transférer un fardeau vers un intervenant capable et puissant.

Si l'intervention est une drogue, vous devenez accro. Plus vous êtes assujetti à l'effet addictif, plus vous y retournez. Pour définir l'addiction, les Alcooliques anonymes parlent de répéter le même comportement stupide encore, encore et encore en espérant aboutir à des résultats différents.

L'addiction consiste à trouver une solution mauvaise et rapide au *symptôme* du problème, ce qui nous empêche ou nous détourne de la tâche plus difficile et plus longue de résoudre le véritable problème. Les politiques addictives sont insidieuses car elles sont si faciles à vendre, si propices à susciter l'engouement.

Les insectes menacent les récoltes ? Au lieu d'examiner les pratiques agricoles, les monocultures, la destruction des régulations naturelles des écosystèmes qui ont favorisé les infestations de nuisibles, il suffit d'épandre des pesticides. Cela chassera les insectes, accroîtra les monocultures et accentuera la destruction des écosystèmes. Ce qui entraînera des infestations plus importantes encore, et nécessitera davantage de pesticides à l'avenir.

Le prix du pétrole augmente ? Au lieu de reconnaître l'épuisement inévitable de cette ressource non renouvelable et d'accroître l'efficacité énergétique ou de passer à d'autres combustibles, il suffit de *bloquer les prix*. (Ce qui a été la première réaction de l'Union soviétique et des États-Unis aux chocs pétroliers des années 1970.) Ainsi pouvons-nous prétendre que rien ne se passe et continuer à brûler du pétrole – aggravant ainsi l'épuisement de la ressource. Quand cette politique ne fonctionnera plus, nous ferons la guerre pour avoir davantage de pétrole. Ou nous trouverons de nouveaux gisements. Tel l'ivrogne qui met sa maison à sac dans l'espoir de trouver une autre bouteille, nous pouvons polluer les plages et envahir les dernières régions sauvages pour découvrir un gros gisement supplémentaire.

Rompre avec une addiction est douloureux. Il peut s'agir de la souffrance physique du sevrage de l'héroïne, du désagrément économique d'une augmentation des prix visant à réduire la consommation d'hydrocarbures, ou des conséquences d'une infestation de nuisibles en attendant que les populations de prédateurs se reconstituent. Le sevrage implique d'affronter enfin l'état réel (et généralement détérioré) du système et d'entreprendre les actions que l'addiction permettait de différer. Parfois, la désaccoutumance peut se faire de manière progressive. Parfois, des mesures non addictives peuvent être mises en place au préalable afin de restaurer le système avec un minimum de turbulences (thérapie de groupe visant à rétablir l'image de soi du toxicomane, isolation des habitations et conception de voitures économiques afin de diminuer la consommation de pétrole, polyculture et rotation des cultures pour réduire la vulnérabilité aux nuisibles). Mais parfois, il n'y a pas d'autre solution que de décrocher d'un seul coup et de prendre son mal en patience.

S'il vaut la peine d'endurer le sevrage pour revenir à un état de non-dépendance, il est bien plus préférable d'éviter l'addiction en premier lieu.

En effet, il est possible d'éviter le problème d'entrée de jeu en intervenant de manière à *renforcer la capacité du système à endosser ses propres fardeaux*. Cette solution qui consiste à aider le système à

s’aider lui-même peut s’avérer bien moins onéreuse et beaucoup plus simple que de le prendre en main – chose que les politiciens libéraux ne semblent pas comprendre. Le secret est non pas de commencer par intervenir de manière autoritaire, mais par se poser un certain nombre de questions :

- Pourquoi les mécanismes de correction naturelle échouent-ils ?
- Comment supprimer les obstacles s’opposant à leur succès ?
- Comment accroître l’efficacité des mécanismes contribuant à leur succès ?

PIÈGE : LE TRANSFERT DU FARDEAU VERS L'INTERVENANT

Le transfert du fardeau, la dépendance et l'addiction surviennent lorsqu'une solution à un problème systémique réduit (ou masque) les symptômes sans rien faire pour résoudre le problème sous-jacent. Qu'il s'agisse d'une substance qui atténue notre perception des choses ou d'une politique qui dissimule la cause sous-jacente, le remède choisi interfère avec les actions qui pourraient résoudre le véritable problème.

Si l'intervention destinée à corriger le problème génère l'atrophie ou l'érosion de la capacité du système initial à assurer son propre maintien, une boucle d'amplification destructrice se met en branle. Le système se détériore ; il faut recourir de plus en plus à la solution. Ainsi le système devient-il de plus en plus dépendant à l'intervention, et de moins en moins capable de maintenir son propre état désiré.

PARADE

Là encore, le meilleur moyen d'échapper à ce piège est de ne pas s'y engager. Méfiez-vous des politiques ou pratiques qui soulagent les symptômes ou ignorent les signaux sans s'atteler véritablement au problème.

Au lieu de privilégier les remèdes à court terme, concentrez-vous sur la restructuration à long terme.

Si vous êtes l'intervenant, faites en sorte de restaurer ou de renforcer la capacité du système à résoudre ses problèmes par lui-même, puis retirez-vous.

Si vous êtes celui qui souffre d'une dépendance intolérable, rétablissez les capacités de votre système avant de mettre fin à l'intervention.

Faites-le immédiatement. Plus vous attendrez, plus le processus de sevrage sera difficile.

Le contournement des règles

« CALVIN : Bon, Hobbes, j'ai un plan.
HOBBES : Ah oui ?
CALVIN : Si je fais dix bonnes actions spontanées d'affilée par jour jusqu'à Noël, le Père Noël devrait être plus clément en jugeant le reste de l'année. Je pourrais prétendre avoir changé de conduite !
HOBBES : Tiens, ça tombe bien, Susie vient par ici.
CALVIN : Je pourrai commencer demain et en faire vingt. »
International Herald Tribune, *1992*[13]

Dès qu'un système fait l'objet de règles, il y aura probablement des gens pour les contourner – en respectant la lettre de la loi tout en pervertissant son esprit. Le contournement des règles ne devient un problème que lorsqu'il entraîne un système dans des distorsions importantes, dans des comportements anormaux qui n'auraient aucun lieu d'être en l'absence de ces règles. S'il échappe à tout contrôle, ce phénomène peut conduire un système à générer des comportements des plus nocifs.

En portant atteinte à la nature, à l'économie, à une organisation ou à l'esprit humain, le détournement d'une loi peut se révéler destructeur. En voici quelques exemples plus ou moins graves :

- Bon nombre de ministères, d'universités et d'entreprises se mettent à jeter l'argent par les fenêtres à la fin de l'exercice fiscal pour la simple raison que s'ils ne dépensent pas l'intégralité de leur budget, ce dernier sera réduit l'année suivante.
- Dans les années 1970, l'État du Vermont a adopté une loi d'occupation des sols (Act 250) instituant un processus complexe pour autoriser les subdivisions en parcelles de 4 hectares ou moins. Si bien qu'aujourd'hui, le Vermont comporte une quantité extraordinaire de parcelles excédant tout juste cette surface.

• Afin de réduire les importations de céréales et de soutenir les agriculteurs locaux, dans les années 1960, la Communauté économique européenne (CEE) a imposé des restrictions sur l'importation des céréales fourragères. Lors de la rédaction de cette loi, les Européens n'ont pas pensé au fait que la racine du manioc convient également aux animaux. Or les restrictions ne concernaient pas ce féculent. Si bien que le maïs importé d'Amérique du Nord a été remplacé par le manioc provenant d'Asie[14].

• Aux États-Unis, l'Endangered Species Act restreint l'urbanisation des zones qui renferment des espèces menacées. Par conséquent, lorsque certains propriétaires fonciers découvrent que leurs terrains en abritent, ils chassent ou empoisonnent délibérément ces espèces afin de rendre leurs parcelles constructibles.

Notez que le contournement des règles donne à penser que ces dernières sont respectées *en apparence*. Les conducteurs se plient aux limitations de vitesse lorsqu'ils sont à proximité d'une voiture de police. Les céréales fourragères ne sont plus importées en Europe. L'urbanisation ne s'étend pas dans les zones où des espèces menacées sont présentes. La « lettre de la loi » est respectée, mais pas son esprit. Ceci doit nous alerter quant à la nécessité de concevoir une loi en tenant compte de l'ensemble du système, y compris ses possibilités d'esquive auto-organisatrice. Le plus souvent, le contournement provient des niveaux hiérarchiques inférieurs en réponse à des règles trop strictes, délétères, inapplicables ou mal définies venant d'en haut. Il existe principalement deux manières d'y réagir. La première consiste à juguler la riposte auto-organisatrice en durcissant les règles ou leur mise en application – ce qui entraîne généralement une distorsion systémique encore plus importante. Le meilleur moyen pour s'enferrer davantage dans le piège.

Pour en sortir, il faut envisager le contournement comme une rétro- action utile et réviser, améliorer, abroger ou mieux expliquer la réglementation. Afin de mieux concevoir une loi, il convient d'anticiper autant que possible ses répercussions sur les sous-systèmes, y compris tout contournement susceptible d'être engendré

par ces derniers, et de structurer les règles de manière à orienter les capacités auto-organisatrices du système dans un sens positif.

PIÈGE : LE CONTOURNEMENT DES RÈGLES

Les règles établies pour encadrer un système sont parfois contournées – comportement pervers qui donne l'impression d'obéir aux règles ou d'atteindre les objectifs, mais qui nuit en réalité au système.

PARADE

Conservez des normes de performances absolues. Mieux encore, laissez les normes s'élever au niveau des meilleures performances réelles au lieu de s'aligner sur les moins bonnes. Instaurez une dérive vers de hautes performances !

La poursuite du mauvais objectif

« Le gouvernement a officiellement reconnu vendredi ce que les économistes du privé disaient depuis des mois : le Japon sera loin d'atteindre l'objectif de croissance de 3,5 % que les planificateurs gouvernementaux avaient fixé il y a un an. […] Le PNB a augmenté de 3,5 % en 1991 et de 5,5 % en 1990.
Depuis le début de cette année fiscale, […] l'économie a stagné ou s'est repliée. […]
Les prévisions […] ayant été revues sensiblement à la baisse, le monde de la politique et des affaires va sans doute exercer une pression accrue sur le ministère des Finances pour qu'il prenne des mesures de relance. »
International Herald Tribune, *1992*[15]

Au chapitre 1, j'ai dit que l'un des moyens les plus puissants d'influer sur le comportement d'un système consistait à agir sur son objectif. En effet, c'est lui qui détermine l'orientation du système, qui définit les écarts nécessitant une intervention, qui indique si les boucles de rétroaction régulatrices fonctionnent de manière correcte, insuffisante ou optimale. Si l'objectif est mal défini, s'il ne mesure pas ce qu'il est censé mesurer, s'il ne reflète pas l'état réel du système, alors le système ne pourra jamais induire un résultat désirable. À l'instar des trois vœux du conte, les systèmes ont une fâcheuse tendance à produire exactement et seulement ce que vous leur demandez. Par conséquent, faites attention à ce que vous leur demandez de produire.

Si l'état désiré du système est la sécurité nationale, et que cette dernière est définie comme la quantité d'argent consacrée à l'armée, le système génèrera des dépenses militaires. Ce qui améliorera ou non la sécurité nationale. Car la sécurité pourrait être ébranlée si ces dépenses nuisaient aux investissements dans d'autres secteurs de l'économie, et si elles servaient à acheter des armes hors de prix, inutiles ou inexploitables.

Si l'état désiré du système est une éducation de qualité, la mesure de cet objectif par la quantité d'argent dépensée par élève permettra de s'assurer du montant dépensé par élève. Si la qualité de l'éducation est évaluée par le biais des résultats obtenus aux tests standardisés, le système génèrera des performances aux tests. Il vaut ensuite la peine de se demander, pour le moins, si ces mesures sont corrélées avec la qualité de l'éducation.

En Inde, durant les premiers temps des programmes de planning familial, les objectifs étaient définis en termes de nombre de dispositifs intra-utérins insérés. Si bien que les médecins, dans leur empressement à remplir leurs objectifs, ont posé des stérilets sans le consentement des patientes.

Dans ces exemples, l'effort déployé est confondu avec le résultat, l'une des erreurs les plus fréquemment commises lorsqu'on conçoit un système en fonction d'un mauvais objectif. La pire en la matière a été d'adopter le produit intérieur brut pour mesurer les

performances économiques d'un pays. Le PIB désigne la valeur marchande des biens et services produits par l'économie nationale. Peu après son instauration, son utilisation en tant que mesure du bien-être humain a été critiquée :

> « Le PIB ne tient pas compte de la santé de nos enfants, de la qualité de leur instruction, ni de la gaieté de leurs jeux. Il ne mesure pas la beauté de notre poésie ou la solidité de nos mariages. Il ne songe pas à évaluer la qualité de nos débats politiques ou l'intégrité de nos représentants. Il ne prend pas en considération notre courage, notre sagesse ou notre culture. Il ne dit rien de notre sens de la compassion ou du dévouement envers notre pays. En un mot, le PIB mesure tout, sauf ce qui fait que la vie vaut la peine d'être vécue[16]. »

> « Notre système de comptabilité nationale ne reflète aucunement l'économie du pays, car il ne témoigne pas de notre vie domestique mais fournit la courbe de température de notre consommation[17]. »

Le PIB met dans le même sac les bonnes et les mauvaises choses. (Si les accidents de voiture sont plus nombreux, et par conséquent les frais médicaux et les factures de garage, le PIB augmente.) Il tient compte uniquement des biens et services commercialisés. (Si tous les parents embauchaient des nounous pour élever leurs enfants, le PIB grimperait.) Il ne reflète pas une répartition équitable. (L'achat d'une résidence secondaire luxueuse par une famille riche accroît davantage le PIB que celui d'un pavillon modeste par une famille pauvre.) Il mesure les efforts déployés plutôt que le résultat obtenu, la production et la consommation brutes plutôt que l'efficacité. Ainsi, des ampoules électriques qui procurent le même éclairage en

consommant huit fois moins et qui durent dix fois plus longtemps feront baisser le PIB.

En effet, le PIB mesure une *production* – les flux de biens fabriqués et achetés au cours d'une année – plutôt que des stocks de capital – les maisons, les voitures, les ordinateurs et les stéréos qui sont à l'origine de la véritable richesse et du véritable plaisir. On pourrait arguer que la meilleure société serait celle où les stocks de capital seraient maintenus et utilisés avec le moins de production possible.

S'il y a tout lieu de souhaiter une économie florissante, il n'y a guère de raison de souhaiter la croissance du PIB. Cependant, les gouvernements du monde entier réagissent au moindre signe de vacillement de cet indicateur en prenant de nombreuses mesures pour qu'il continue à augmenter. Nombre de ces interventions ne sont que pur gaspillage, stimulant la production inefficace de biens dont personne n'a vraiment besoin. Certaines d'entre elles, comme la surexploitation des forêts pour relancer l'économie à court terme, nuisent à long terme à l'économie, à la société ou à l'environnement.

Si vous décidez que l'objectif d'une société est son PIB, cette société fera tout son possible pour générer du PIB. Elle ne produira bien-être, équité, justice ou efficacité que si vous prenez pour objectif et mesurez régulièrement son bien-être, son équité, sa justice ou son efficacité. Le monde serait tout autre si au lieu de rivaliser pour avoir le plus gros PIB par tête, les nations rivalisaient pour avoir les stocks de richesse *per capita* les plus importants avec la production la plus faible, ou la mortalité infantile la plus basse, ou la liberté politique la plus grande, ou l'environnement le plus propre, ou l'écart le plus faible entre riches et pauvres.

Poursuivre le mauvais objectif, satisfaire le mauvais indicateur est une caractéristique systémique qui est presque à l'opposé du contournement des règles. Avec ce dernier, le système esquive une réglementation impopulaire ou mal conçue tout en donnant l'impression de s'y plier. Lorsqu'il poursuit un mauvais objectif, le système suit docilement la règle et génère le résultat spécifié – qui ne correspond pas toujours à ce que quiconque souhaite vraiment. Vous rencontrez le problème du mauvais objectif quand un phénomène absurde se produit « parce que c'est la règle ». Vous avez affaire au

problème du contournement quand un phénomène absurde se produit parce que la règle a été biaisée. Ces deux perversions systémiques peuvent d'ailleurs survenir simultanément en réponse à une même règle.

PIÈGE : LA POURSUITE DU MAUVAIS OBJECTIF

Le comportement d'un système est particulièrement sensible aux objectifs des boucles de rétroaction. Si les objectifs – les indicateurs témoignant du respect des règles – sont définis de manière erronée ou incomplète, le système risque de fonctionner docilement pour produire un résultat qui n'est pas réellement visé ou souhaité.

PARADE

Déterminez des indicateurs et objectifs qui reflètent le véritable bien-être du système. Veillez en particulier à ne pas confondre l'effort déployé et le résultat ; sinon vous obtiendrez un système qui génère un effort et non un résultat.

INTERLUDE

L'objectif de l'architecte naval

Autrefois, les adeptes de la course à la voile participaient aux régates non pour les millions de dollars ou la gloire nationale, mais juste pour le plaisir. Ils utilisaient pour cela les bateaux qu'ils possédaient déjà pour pêcher, transporter des marchandises ou sortir le week-end.

Rapidement, on s'aperçut que les courses étaient plus intéressantes lorsque les voiliers concurrents étaient à peu près comparables en termes de vitesse et de maniabilité. Si bien que les règles évoluèrent, définissant différentes classes de bateaux selon leur longueur, leur surface de voile et d'autres

paramètres, et restreignant chaque course aux concurrents d'une même classe.
Dès lors, les voiliers furent conçus non pour une utilisation normale, mais pour remporter des courses dans les catégories prévues par les règlements. Les architectes navals tirèrent toute la vitesse possible du moindre centimètre carré de voile et réduisirent au maximum le poids. Ils obtinrent ainsi des bateaux aussi étranges à voir qu'à manier avec lesquels vous n'auriez aucune envie d'aller pêcher ou faire votre sortie dominicale. Et plus les compétitions sont devenues sérieuses, plus les règles sont devenues strictes et les embarcations bizarres.
Désormais les voiliers de course sont extrêmement rapides, réactifs et instables. Seuls des équipages athlétiques et expérimentés parviennent à les manier. Il ne viendrait à l'idée de personne d'utiliser un voilier de la Coupe de l'America dans un autre cadre que celui d'une régate en se conformant au règlement. Les bateaux sont tellement optimisés en fonction des règles en vigueur qu'ils ont perdu toute résilience. La moindre modification du règlement les mettrait hors jeu.

TROISIÈME PARTIE

SUSCITER LE CHANGEMENT DANS LES SYSTÈMES COMME DANS NOTRE PHILOSOPHIE

6.

Les points de levier, lieux d'intervention dans un système

« IBM […] a annoncé la suppression de 25 000 emplois ainsi qu'une diminution importante de son budget de recherche. […] Les dépenses allouées à la recherche en développement seront réduites de 1 milliard de dollars l'an prochain. […]
Selon le président du conseil d'administration John F. Akers […], IBM est toujours un leader mondial de la recherche dans son secteur, mais estime pouvoir faire mieux en "se repositionnant sur les domaines propices à la croissance", autrement dit sur les services qui nécessitent moins de capital mais sont également moins rentables à long terme. »
Lawrence Malkin, International Herald Tribune*, 1992*[1]

Alors, comment modifier la structure d'un système pour qu'il produise davantage de ce que nous souhaitons et moins de ce qui est indésirable ? Après avoir travaillé de nombreuses années avec des entreprises sur leurs problèmes systémiques, Jay Forrester du Massachusetts Institute of Technology aime à dire que le cadre moyen est capable de déterminer le problème actuel de façon très pertinente, d'identifier la structure systémique qui l'engendre et de deviner avec une grande précision où il faut rechercher les points de levier – les endroits du système où un petit changement peut entraîner une transformation majeure du comportement.

Loin d'être spécifique à l'analyse systémique, cette idée est ancrée dans la légende : la balle d'argent, le compensateur, le remède miracle, le passage secret, la formule magique, le héros providentiel qui renverse le cours de l'histoire, la solution quasi simplissime qui permet de surmonter des obstacles gigantesques. Non seulement nous voulons croire en l'existence des points de levier, mais nous voulons savoir où ils se trouvent et comment mettre la main dessus. Car ils sont puissants.

Cependant, Jay Forrester précise ensuite que même si les personnes profondément impliquées dans un système savent intuitivement où trouver ces points de levier, elles poussent la plupart du temps le changement dans la *mauvaise direction*.

L'exemple classique de cette intuition erronée est ma propre initiation à l'analyse systémique avec le modèle World. Le Club de Rome – groupe de réflexion rassemblant des hommes d'affaires, des hauts fonctionnaires et des scientifiques de différents pays – a un jour demandé à mon professeur de montrer en quoi les problèmes mondiaux de la pauvreté et de la faim, de la destruction environnementale, de l'épuisement des ressources, de la détérioration urbaine et du chômage étaient reliés, et comment l'on pourrait y remédier. Pour cela, Forrester a développé un modèle informatique (baptisé World) qui a clairement fait ressortir un point de levier : la croissance[2]. Non seulement démographique, mais économique. La croissance implique aussi bien des coûts que des bénéfices. Or nous en ignorons généralement les coûts, parmi lesquels figurent la pauvreté et la faim, la destruction environnementale, etc. – toute la liste des problèmes que nous tentons de résoudre par la croissance ! Ce dont nous avons besoin est une croissance beaucoup plus lente, différents types de croissance, et dans certains cas une croissance nulle ou négative.

Les dirigeants mondiaux font à raison une fixation sur la croissance économique en tant que réponse à la quasi-totalité des problèmes, *mais ils poussent de toutes leurs forces dans la mauvaise direction*.

Un autre classique de Forrester est l'étude sur la dynamique urbaine qu'il a publiée en 1969, où il montre que la construction de

logements subventionnés à bas prix constitue un point de levier[3]. Moins il y a de logements sociaux, *mieux la ville se porte* – y compris ses résidents à faible revenu. Ce modèle ayant paru à l'époque où la politique nationale imposait massivement des programmes de logements à bas prix, on a ri au nez du théoricien des systèmes. Mais depuis, nombre de ces projets ont été démolis, ville après ville.

Contre-intuitifs – ainsi Forrester qualifiait-il les systèmes complexes. Bien souvent, les points de levier n'ont rien d'intuitif. Ou lorsqu'ils le sont, nous les employons trop souvent à l'envers, en aggravant davantage les problèmes que nous tentons de résoudre.

Je n'ai pas trouvé la moindre formule simple ou rapide pour déterminer les points de levier des systèmes complexes et dynamiques. Si vous me donnez quelques mois ou années, j'y parviendrai. Mais je sais par expérience qu'ils sont tellement contre-intuitifs que lorsque je découvre les points de levier d'un système, quasiment personne ne veut me croire. Ce qui est très frustrant – notamment pour ceux d'entre nous qui n'aspirent pas uniquement à comprendre les systèmes complexes, mais à faire en sorte que le monde fonctionne mieux.

C'est dans un tel moment de frustration que j'ai proposé, lors d'une réunion consacrée aux implications de la mondialisation du commerce, une liste d'endroits où l'on peut intervenir dans un système. Je vous offre cette liste en toute humilité, dans l'espoir qu'elle évolue par la suite. Ce qui a bouillonné en moi ce jour-là avait été distillé durant des décennies d'analyses rigoureuses de nombreux types de systèmes différents par de nombreuses personnes intelligentes. Mais les systèmes complexes sont, de fait, complexes. Il est dangereux de généraliser à leur sujet. Ce que vous lirez ci-dessous est un travail en cours, et non une recette pour trouver des points de levier. Pour être plus exacte, c'est une invitation à réfléchir de manière plus large à la transformation d'un système.

Lorsqu'un système se complexifie, son comportement devient surprenant. Voyez par exemple votre compte bancaire. Vous émettez des chèques et vous faites des dépôts. Un petit intérêt vous est versé (si votre compte est suffisamment bénéficiaire) tandis que des frais

bancaires vous sont débités même si votre solde est nul, créant ainsi une dette qui s'accumule. Associez maintenant votre compte à un millier d'autres et laissez la banque accorder des prêts en fonction de l'ensemble fluctuant des dépôts, reliez un millier de ces banques en un système de réserve fédérale, et vous constaterez comment de simples systèmes de stocks et flux, combinés entre eux, génèrent des systèmes beaucoup trop complexes et mouvants pour que vous puissiez les appréhender facilement.

Voilà pourquoi les points de levier sont bien souvent peu intuitifs. Mais assez de théorie systémique, passons à la liste de ces 12 lieux d'intervention possibles dans un système, par ordre croissant d'efficacité.

12. Les chiffres : les paramètres tels que les subventions, les taxes et les normes

Rappelez-vous le système basique de stock et flux de la baignoire au chapitre 1. L'ampleur des flux est une question de chiffres et de vitesse à laquelle il est possible de modifier ces derniers. Peut-être que le robinet tourne difficilement, auquel cas il faudra du temps pour ouvrir ou interrompre l'alimentation en eau. Peut-être que la canalisation est bouchée, auquel cas l'évacuation ne se fera jamais rapidement. Ou peut-être que le robinet a une capacité d'alimentation digne d'une lance de pompier. Si certains de ces paramètres sont physiquement verrouillés, d'autres peuvent être modifiés et constituent donc des points d'intervention connus.

Prenons la dette publique. Ce puits financier vous semblera sans doute un stock étrange. La vitesse à laquelle la dette se creuse est qualifiée de déficit annuel. Les impôts comblent le gouffre, tandis que les dépenses du gouvernement l'approfondissent. Le Congrès et le président passent la majeure partie de leur temps à débattre des innombrables paramètres qui accroissent (dépenses) ou réduisent (impôts) la profondeur du puits. Ces flux étant liés à nous autres

électeurs, les paramètres de ce type sont politiquement connotés. Mais peu importe la quantité de feux d'artifice et le parti aux manettes, le puits ne cesse de se vider depuis de nombreuses années, quoique à des rythmes différents.

Afin de réguler l'insalubrité de l'air que nous respirons, le gouvernement instaure des paramètres appelés normes de qualité de l'air ambiant. Afin d'assurer un certain stock de forêts (ou un certain flux d'entrée d'argent pour l'industrie forestière), il détermine la quantité de coupes annuelles autorisées. Les entreprises ajustent des paramètres tels que les salaires et les prix de vente tout en ayant un œil sur le niveau de la baignoire de leurs profits – la ligne rouge infranchissable.

La surface de terres que nous préservons chaque année. Le salaire minimum. Le budget que nous consacrons à la recherche sur le sida ou à la production de bombardiers furtifs. Les frais de gestion que la banque prélève sur votre compte. Ce sont tous des paramètres, des variables d'ajustement, des réglages de robinet. Tout comme le licenciement et l'embauche de nouvelles recrues, hommes politiques inclus. Mettre d'autres mains sur les robinets modifiera peut-être la vitesse à laquelle ils tourneront, mais si ce sont les mêmes vieux robinets, fixés sur la même vieille plomberie, actionnés suivant les mêmes informations, objectifs et règles d'antan, le comportement du système ne changera guère. L'élection de Bill Clinton a indéniablement constitué un changement par rapport à celle de George Bush père, mais un changement limité, car tous les présidents sont branchés sur le même système politique. (Changer la manière dont l'argent circule au sein de ce système ferait une tout autre différence – mais j'avance trop vite dans la liste.)

Les chiffres, la valeur des flux figurent en dernière position sur ma liste des interventions efficaces. S'exciter sur ces détails revient à réarranger les chaises longues sur le pont du *Titanic*. Sans doute 90 % – ou plutôt 95 %, voire 99 % – de notre attention se porte sur les paramètres, alors qu'ils n'offrent qu'un faible potentiel de levier.

Non pas que les paramètres n'aient aucune importance – ils peuvent en avoir, notamment à court terme et pour l'individu qui est directement soumis au flux. Les gens se soucient beaucoup des

variables telles que les impôts et le salaire minimum, au point de mener des luttes acharnées. Mais la modification de ces paramètres *change rarement le comportement du système de l'économie nationale*. Si le système stagne en général, une telle modification le stimulera rarement. S'il est très variable, elle ne le stabilisera généralement pas. S'il croît de manière incontrôlée, elle ne le ralentira pas.

Quel que soit le plafond des contributions financières aux campagnes électorales, la politique n'en sera pas pour autant assainie. La Réserve fédérale a eu beau tripatouiller les taux d'intérêt, les cycles économiques ont persisté. (Nous l'oublions toujours en période d'expansion, et nous sommes au trente-sixième dessous lorsqu'une récession survient.) Après s'être pliée durant des décennies aux normes de pollution atmosphérique les plus drastiques au monde, Los Angeles est moins polluée, mais elle l'est toujours. De même, dépenser davantage en forces de police ne fait pas disparaître la criminalité.

Comme je m'apprête à mentionner des exemples où des paramètres constituent des points de levier, je me permets ici de vous mettre en garde. Les paramètres deviennent des points de levier lorsqu'ils entrent dans une plage critique, faisant bouger l'un des éléments situés plus haut dans la liste. Par exemple, les taux d'intérêt ou de natalité contrôlent les gains occasionnés par les boucles de rétroaction amplificatrices. Ou encore, les objectifs des systèmes sont des paramètres qui peuvent faire une grosse différence.

Mais ces seuils critiques sont loin d'être aussi courants que les gens semblent le croire. La plupart des systèmes ont évolué ou ont été conçus pour rester très loin des plages de paramètres critiques. La plupart du temps, les chiffres ne valent pas la sueur qu'on leur consacre.

Pour illustrer ce point, voici une anecdote que m'a transmise un ami par Internet.

« Quand je suis devenu propriétaire bailleur, j'ai dépensé beaucoup de temps et d'énergie à essayer de déterminer ce qui

serait un loyer “équitable”. J’ai envisagé toutes les variables, parmi lesquelles les revenus relatifs de mes locataires, mes propres revenus et besoins en liquidités, les dépenses destinées à l’entretien et celles affectées aux grosses réparations, la part de mon emprunt immobilier correspondant au principal et aux intérêts, la valeur des travaux que j’effectue moi-même, etc. Je ne suis arrivé nulle part. Finalement, je me suis adressé à une conseillère financière qui m’a dit : “Vous vous comportez comme s’il y avait une limite précise où le loyer serait équitable, au-delà de laquelle le locataire se ferait rouler et en dessous de laquelle vous seriez pigeonné.

En réalité, il y a une large zone grise dans laquelle aussi bien vous que le locataire faites une bonne affaire, ou du moins une affaire équitable. Cessez de vous inquiéter, et continuez à mener votre vie”[4]. »

11. Les tampons : la taille des stocks de stabilisation par rapport aux flux associés

Imaginez une immense baignoire dont les flux entrant et sortant sont lents. Puis une petite baignoire aux flux très rapides. La différence est la même entre un lac et une rivière. Vous entendez beaucoup plus souvent parler d’inondations catastrophiques occasionnées par une rivière que par un lac. En effet, les stocks qui ont une grande ampleur comparativement à leurs flux sont plus stables. En chimie et dans d’autres domaines, un gros stock de stabilisation est qualifié de tampon.

Le pouvoir stabilisateur des stocks tampons explique pourquoi vous gardez de l’argent sur votre compte en banque plutôt que de

vivre au jour le jour en fonction de la monnaie que vous avez en poche. Voilà pourquoi les magasins accumulent un certain stock au lieu de se réapprovisionner à chaque fois qu'un client ressort avec un article. Voilà pourquoi il faut maintenir plus que la population reproductrice minimale d'une espèce vivante menacée. À l'est des États-Unis, les sols sont plus sensibles aux pluies acides qu'à l'ouest car ils n'ont pas de stocks tampons de calcium suffisants pour neutraliser l'acide.

On parvient souvent à stabiliser un système en accroissant la capacité d'un tampon[5]. Mais si le stock tampon est trop important, le système devient rigide car il réagit trop lentement. Et certains tampons de grande taille, comme les réservoirs de barrage ou les stocks de magasin, coûtent très cher à construire et à maintenir. Les entreprises ont inventé la gestion de stocks à flux tendu parce que la vulnérabilité occasionnelle aux fluctuations ou aux cafouillages est moins onéreuse (du moins pour eux) que des coûts de stockage certains et permanents – et parce qu'un stock réduit ou nul permet de réagir avec davantage de souplesse aux variations de la demande.

Modifier la taille des stocks tampons constitue un point de levier, parfois magique. Cependant, les tampons sont généralement des entités physiques qui sont difficiles à transformer. La capacité d'absorption des sols à l'est du pays n'offre aucun levier pour réduire les répercussions des pluies acides. La capacité de stockage d'un barrage est déterminée une fois pour toutes à sa construction. Voilà pourquoi je n'ai pas placé les tampons très haut sur ma liste des points de levier.

10. La structure des stocks et flux : les systèmes physiques et leurs nœuds d'intersection

La « tuyauterie » d'un système – ses stocks et flux et leur agencement physique – peut avoir une énorme influence sur son fonctionnement. Lorsque le réseau routier hongrois a été conçu de manière à ce que tout le trafic soit obligé de passer par Budapest au centre du pays, cela a grandement contribué à la pollution de l'air et à l'allongement des trajets quotidiens – auxquels on peut difficilement remédier par des dispositifs antipollution, des feux tricolores ou des limitations de vitesse.

Le seul moyen de parer la mauvaise conception d'un système est de le reconstruire, si c'est possible. Amory Lovins et son équipe du Rocky Mountain Institute ont réalisé des prodiges en matière d'économies d'énergie dans les réseaux par le simple fait de redresser des tuyaux courbés et d'agrandir la section d'autres canalisations. En remaniant ainsi tous les bâtiments des États-Unis, nous pourrions fermer bon nombre de nos centrales électriques.

Mais la reconstruction physique est souvent le changement le plus lent et le plus coûteux que l'on puisse apporter à un système. Et certaines structures de stocks et flux sont tout bonnement impossibles à changer. Par l'essor démographique, le baby-boom a d'abord exercé une pression sur l'enseignement primaire, puis sur le secondaire, l'université, l'emploi et le logement ; aujourd'hui, nous assumons la retraite de cette population. Nous n'y pouvons pas grand-chose, car les enfants de 5 ans auront ensuite 6 ans, et les seniors de 64 ans passeront à 65 de manière prévisible et inexorable. De même pour la durée de vie des molécules de chlorofluorocarbure (CFC) dans la couche d'ozone, pour la vitesse à laquelle les polluants disparaissent des aquifères, ou pour le fait qu'une flotte de voitures inefficaces circule 10 à 20 ans avant d'être remplacée.

La structure physique d'un système est cruciale, mais elle n'offre guère de point de levier car sa modification est rarement simple ou rapide. Le point de levier consiste à concevoir d'emblée le système de manière appropriée. Une fois la structure construite, le levier consistera à connaître ses limites et ses goulots d'étranglement, à l'utiliser avec une efficacité maximale et à éviter les fluctuations ou expansions qui mettent sa capacité à rude épreuve.

9. Les délais : la durée par rapport à la vitesse de changement du système

Les délais intervenant dans les boucles de rétroaction influent de manière déterminante sur le comportement d'un système. Ils génèrent couramment des oscillations. Si vous essayez d'ajuster un stock (celui de votre magasin) pour atteindre votre objectif, mais que vous recevez avec retard les informations relatives à son état, vous aboutirez au-delà ou en deçà du but visé. De même si les informations vous parviennent à temps, mais que votre délai de réaction est trop long. Par exemple, il faut plusieurs années pour construire une centrale électrique qui fonctionnera pendant 30 ans. Ces délais rendent impossible la construction du nombre exact de centrales afin de satisfaire une demande en électricité qui évolue rapidement. Même avec des efforts considérables en matière de prévisions, la plupart des industries électriques du monde connaissent de longues oscillations entre surcapacité et sous-capacité. Un système soumis à des délais à long terme ne peut tout simplement pas réagir à des changements à court terme. Voilà pourquoi un gigantesque système de planification centralisée comme l'Union soviétique ou General Motors est voué à mal fonctionner.

Quand nous comprenons à quel point les délais sont importants, nous les voyons partout où nous regardons. Par exemple, le délai entre le moment où un polluant est rejeté sur le sol et celui où il s'infiltre dans les eaux souterraines ; le délai entre la naissance d'un enfant et le moment où lui-même pourra avoir un enfant ; le délai entre le premier essai réussi d'une nouvelle technologie et le moment où celle-ci aura pénétré l'ensemble de l'économie ; ou encore le temps nécessaire pour qu'un prix s'ajuste à un déséquilibre entre l'offre et la demande.

Dans un processus de rétroaction, la longueur du délai est cruciale *selon la rapidité de modification du stock que la boucle de rétroaction s'efforce de contrôler*. Un délai trop court peut entraîner une surréaction – le serpent se mord la queue –, des oscillations amplifiées par la vivacité de la réaction. Un délai trop long occasionnera l'atténuation, le maintien ou l'explosion des oscillations selon l'importance du retard. Enfin, un délai démesuré dans un système présentant un seuil, un point dangereux, une fourchette au-delà de laquelle des dommages irréversibles peuvent survenir, conduira au dépassement et à l'effondrement.

Je classerais volontiers la longueur des délais comme un point de levier majeur, sauf que ces derniers sont rarement faciles à modifier. Il faut laisser le temps au temps. Vous ne pourrez pas changer grand-chose à la durée de construction d'un élément principal du capital, au temps de maturation d'un enfant ou au rythme de croissance d'une forêt. Il est généralement plus simple de *freiner le changement* afin que les inévitables délais de rétroaction génèrent le moins de problèmes possible. Voilà pourquoi les taux de croissance sont mieux placés que les délais sur la liste des points de levier.

Cela explique aussi pourquoi ralentir la croissance économique constitue un point de levier plus important dans le modèle World de Forrester que d'accélérer le développement technologique ou de libérer davantage les prix du marché. Ces mesures s'attachent à accroître la vitesse d'ajustement. Cependant, le stock de capital physique de la planète, ses usines et ses chaudières, manifestations concrètes des technologies à l'œuvre, ne peuvent changer plus rapidement, quelle que soit l'évolution des prix ou des idées – d'ailleurs les prix et les idées ne changent pas davantage en un clin d'œil, du moins pas à l'échelle du monde. Nous disposons d'un levier plus important en freinant le système, afin que les technologies et les prix suivent le rythme, qu'en espérant faire disparaître les délais.

Toutefois, si votre système comporte un délai qui *peut* être changé, vous obtiendrez sans doute des effets majeurs. Attention ! Veillez à le modifier dans le bon sens ! (Par exemple, la tendance actuelle à réduire les délais d'information et de transfert monétaire

sur les marchés financiers ne fait qu'entraîner des fluctuations délirantes.)

8. Les boucles régulatrices : la force de la rétroaction par rapport à l'impact à corriger

Nous commençons à passer de la partie physique du système aux parties liées à l'information et à la régulation, qui offrent davantage de points de levier.

Les boucles de rétroaction régulatrices sont omniprésentes dans les systèmes. La nature les élabore et les humains les inventent en tant que moyens de contrôle pour maintenir des stocks importants dans des limites acceptables. Le thermostat en est l'exemple classique. Son objectif est de maintenir le stock appelé « température de la pièce » à un niveau relativement constant, proche de la température souhaitée. Toute boucle de rétroaction régulatrice nécessite un objectif (réglage du thermostat), un dispositif de surveillance et de signalement pour détecter les déviations (thermostat), et un mécanisme de réaction (chaudière et/ou climatiseur, ventilateurs, pompes, tuyaux, combustible, etc.).

Un système complexe présente en général une quantité de boucles régulatrices qu'il peut activer de manière à s'autocorriger dans différentes conditions et en fonction de divers impacts. Certaines de ces boucles restent inactives la majeure partie du temps – comme le système de refroidissement d'urgence d'une centrale nucléaire, ou votre capacité à transpirer ou à frissonner pour maintenir votre température corporelle –, mais leur présence est essentielle au bien-être à long terme du système.

L'une des plus grandes erreurs que nous commettons est de supprimer ces mécanismes de réaction d'« urgence » parce qu'ils servent rarement et qu'ils paraissent coûteux. À court terme, nous n'observons aucune répercussion de cet acte. Cependant, à long terme, nous réduisons drastiquement l'éventail de conditions

auxquelles le système pourra survivre. L'un des exemples les plus navrants est lorsque nous empiétons sur les habitats d'espèces menacées. Ou lorsque nous grignotons sur notre propre temps de repos, de loisir, de socialisation ou de méditation.

L'efficacité d'une boucle régulatrice – sa capacité à maintenir un stock donné au niveau ou à proximité de son objectif – dépend de l'association de tous ses paramètres et liens – justesse et rapidité de la surveillance, vitesse et puissance de la réaction, ampleur et précision des flux correctifs. Des points de levier s'y trouvent parfois.

Voyez par exemple les marchés, ces systèmes à rétroaction régulatrice auxquels de nombreux économistes vouent quasiment un culte. Certes, ils font parfois des merveilles en termes d'autocorrection quand les prix fluctuent pour modérer l'offre et la demande et les maintenir en équilibre. Le prix est la principale information qui sert de signal aux producteurs comme aux consommateurs. Plus les prix sont clairs, non équivoques, opportuns et honnêtes, plus les marchés fonctionnent sans heurts. Les prix reflétant l'*intégralité* des coûts indiqueront aux consommateurs ce qu'ils peuvent réellement se permettre et récompenseront les producteurs efficaces. Entreprises et gouvernements sont irrésistiblement attirés par le point de levier des prix, qu'ils poussent trop souvent avec détermination dans la mauvaise direction à coups de subventions, de taxes et d'autres formes de désordre.

Ces intervenants réduisent le pouvoir de rétroaction des signaux du marché en déformant l'information en leur faveur. Le *véritable* levier consiste à les en empêcher. D'où la nécessité d'introduire des lois antitrust, de réglementer la publicité mensongère, d'internaliser les coûts (taxes sur la pollution par exemple), de supprimer les subventions perverses et de recourir à d'autres moyens pour rendre les marchés plus équitables.

Toutefois, le renforcement et la clarification des signaux du marché, entre autres par la prise en compte de l'intégralité des coûts, ne sont guère efficaces de nos jours du fait de l'affaiblissement d'un autre ensemble de boucles régulatrices : celles relatives à la démocratie. Ce formidable système a été inventé pour introduire une

rétroaction autocorrective entre le peuple et son gouvernement. Informé sur les actions entreprises par ses représentants, le peuple réagit en votant à nouveau pour eux ou pas. Le processus repose sur un flux d'informations libre, complet et impartial entre les électeurs et les dirigeants. Or des milliards de dollars sont employés pour limiter, déformer et dominer la circulation des informations. Donnez à ceux qui veulent fausser les signaux des prix le pouvoir d'influer sur le gouvernement, laissez les diffuseurs d'informations avoir des conflits d'intérêts, et aucune des rétroactions régulatrices indispensables ne fonctionnera correctement. Le marché et la démocratie s'érodent tous deux.

La force d'une boucle de rétroaction régulatrice doit être *en rapport avec l'impact qu'elle est censée corriger*. Si l'impact augmente, la rétroaction doit également être renforcée. Un thermostat peut fonctionner convenablement par une froide journée d'hiver, mais si vous ouvrez toutes les fenêtres en grand, sa capacité de correction ne sera pas à la hauteur de l'écart de température imposé au système. De même, la démocratie fonctionne mieux sans le pouvoir qu'a la communication de masse centralisée à bourrer le crâne des gens. Les systèmes traditionnels de régulation de la pêche étaient suffisants jusqu'à ce que les sonars, filets dérivants et autres avancées technologiques permettent à quelques acteurs de rafler les derniers poissons. La puissance de la grosse industrie nécessite la puissance d'un gouvernement fort pour la réfréner. Une économie mondiale nécessite une réglementation mondiale.

Voici quelques exemples de mesures pour renforcer les boucles de rétroaction régulatrices de manière à accroître la capacité d'autocorrection d'un système :

• médecine préventive, exercice physique et nutrition pour renforcer

la capacité de l'organisme à lutter contre la maladie ;

• lutte intégrée contre les nuisibles visant à favoriser

le développement de leurs prédateurs naturels ;

• loi sur l'accès à l'information (Freedom of Information Act)

visant à réduire le secret gouvernemental ;

• systèmes de surveillance des dommages causés à l'environnement ;
• protection des lanceurs d'alerte ;
• redevances sur les impacts, taxes sur la pollution et cautions de bonne exécution visant à compenser les coûts externalisés imputables aux profits privés.

7. Les boucles de rétroaction amplificatrices : la puissance du gain procuré par les boucles de renforcement

Les boucles régulatrices s'autocorrigent, tandis que les boucles amplificatrices s'autorenforcent. Plus une boucle amplificatrice fonctionne, plus elle gagne en capacité à fonctionner davantage en entraînant le système dans une direction. Plus les gens sont nombreux à attraper la grippe, plus ils infectent de nouvelles personnes. Plus il y a de bébés qui naissent, plus il y a de gens qui ont des enfants une fois parvenus à l'âge adulte. Plus vous avez d'argent à la banque, plus vous touchez d'intérêts, et plus votre compte est créditeur. Plus le sol est érodé, moins la végétation s'y développe, moins il y a de racines et de feuilles pour atténuer le ruissellement, et plus le sol s'érode. Plus la masse critique de matériau nucléaire contient de neutrons à haute énergie, plus ces derniers entrent en collision avec des noyaux et génèrent d'autres neutrons à haute énergie, entraînant une explosion ou fusion nucléaire.

Les boucles de rétroaction amplificatrices sont sources de croissance, d'explosion, d'érosion ou d'effondrement. Un système doté d'une boucle amplificatrice non régulée finit par s'autodétruire. Ce qui explique pourquoi il y en a si peu. En général, une boucle régulatrice intervient tôt ou tard. L'épidémie s'arrêtera faute de personnes à infecter – ou les gens prendront des mesures de plus en

plus rigoureuses pour éviter d'être infectés. Le taux de mortalité augmentera jusqu'à rejoindre le taux de natalité – ou les gens verront les conséquences d'une croissance démographique incontrôlée et feront moins d'enfants. Le sol s'érodera jusqu'à la roche mère, laquelle se dégradera pour former une nouvelle couche arable au bout d'un million d'années – ou bien les hommes cesseront le surpâturage, construiront des barrages de retenue ou planteront des arbres pour mettre fin à l'érosion.

Dans tous ces exemples, la première conséquence survient si la boucle continue sur sa lancée, et la seconde se produit si l'on intervient pour restreindre son pouvoir automultiplicateur. Réduire le gain généré par une boucle amplificatrice – en freinant la croissance – constitue généralement un point de levier plus puissant que de renforcer les boucles régulatrices. Et c'est bien préférable à la solution de laisser la boucle aller jusqu'au bout.

Dans le modèle World de Forrester, les taux de croissance économique et démographique sont des points de levier car le fait de les ralentir donne aux nombreuses boucles régulatrices – par le biais de la technologie, des marchés ou d'autres formes d'adaptation (qui sont tous soumis à des limites et des délais) – le temps d'opérer. C'est la même chose si vous levez le pied quand vous roulez trop vite, plutôt que de demander des freins plus réactifs ou une technologie avancée en matière de direction.

Au sein de nos sociétés, nombreuses sont les boucles de rétroaction amplificatrices qui récompensent les vainqueurs d'une compétition par des ressources leur permettant de gagner encore plus gros la fois suivante – le piège du « succès qui va au succès ». Les riches récoltent des intérêts ; les pauvres en paient. Les riches embauchent des conseillers fiscaux et comptent sur les politiciens pour réduire leurs impôts ; les pauvres ne le peuvent pas. Les riches font bénéficier leurs enfants d'un héritage et de bonnes études. Or les programmes de lutte contre la pauvreté sont de piètres boucles régulatrices pour compenser ces puissantes boucles amplificatrices. Il serait beaucoup plus efficace de réfréner ces dernières. Tel est l'objectif des mesures que sont les impôts progressifs, les droits de succession ou les programmes d'enseignement public de qualité

pour tous. Si les riches ont la possibilité d'influencer le gouvernement pour qu'il sape ces dispositifs au lieu de les renforcer, le gouvernement lui-même passe d'une structure régulatrice à un système qui renchérit la réussite des nantis ! Cherchez des points de levier autour des taux de natalité, des taux d'intérêt, du rythme d'érosion, des boucles amplificatrices du succès, à tout endroit où plus on possède d'une chose, plus on a la possibilité d'en recevoir davantage.

6. La structure des flux d'informations : qui a et n'a pas accès à l'information

Au chapitre 4, nous avons relaté l'histoire des compteurs électriques d'un lotissement aux Pays-Bas. Dans certaines maisons, ceux-ci avaient été installés au sous-sol, tandis que dans les autres ils trônaient à la vue de tous dans le hall d'entrée. Identiques par ailleurs, ces dernières consommaient 30 % d'électricité en moins.

J'adore cette histoire car elle offre un exemple de point de levier considérable au sein de la structure des flux d'informations d'un système. Il ne s'agit ni d'un ajustement de paramètre, ni du renforcement ou de l'atténuation d'une boucle de rétroaction existante, mais d'une nouvelle boucle fournissant une rétroaction à un endroit où il n'y en avait pas auparavant.

Les flux d'informations manquants figurent parmi les causes les plus courantes du mauvais fonctionnement d'un système. L'apport ou le rétablissement d'informations peut s'avérer une façon d'agir puissante, en général plus facile et moins coûteuse que la reconstruction d'une infrastructure physique. La tragédie des communs qui entraîne l'effondrement de la pêche commerciale mondiale s'explique par la faible rétroaction de l'état de la faune marine sur la décision d'investir dans de nouveaux bateaux de pêche. Contrairement à l'opinion économique répandue, le *prix* du poisson ne génère pas cette rétroaction. Plus le poisson se raréfie,

plus il devient cher, et plus il est rentable d'aller attraper les derniers spécimens. Il s'agit d'une rétroaction perverse, une boucle amplificatrice qui mène à l'effondrement. Ce n'est pas l'information sur le prix qui fait défaut, mais l'information sur la population de poissons.

Il importe de réintroduire l'information manquante à l'endroit approprié et sous une forme persuasive. Pour prendre un autre exemple de tragédie des communs, il ne suffit pas de prévenir tous les usagers d'un aquifère que le niveau des eaux souterraines est en train de baisser. Cela pourrait les inciter au contraire à se précipiter sur les dernières réserves. Il serait plus efficace d'augmenter radicalement le prix de l'eau dès lors que le taux de prélèvement excède le taux de recharge.

Les exemples de rétroactions persuasives sont faciles à trouver. Imaginez qu'on demande aux contribuables de spécifier sur leur déclaration d'impôts à quels services publics leur argent doit être attribué. (Démocratie radicale !) Imaginez que toute ville ou entreprise soit obligée de prélever son eau immédiatement *en aval* de sa propre évacuation d'eaux usées dans le fleuve. Imaginez que tout responsable public ou privé décidant d'investir dans une centrale nucléaire doive stocker les déchets de cet équipement sur sa propre pelouse. Imaginez enfin (exemple s'il en est) que les dirigeants déclarant une guerre soient contraints de la passer eux-mêmes sur le front.

Les êtres humains ont une tendance systématique à éviter d'endosser la responsabilité de leurs propres décisions. Voilà pourquoi tant de boucles de retour d'information font défaut – et pourquoi ce type de point de levier est si souvent prisé par les masses, haï par les autorités constituées, et d'une grande efficacité si vous obtenez que lesdites autorités le mettent en œuvre (ou si vous les contournez pour qu'il soit mis en œuvre).

5. Les règles : incitations, sanctions et contraintes

Les règles d'un système déterminent son étendue, ses limites, ses degrés de liberté. Tu ne tueras point. Tout individu a droit à la liberté d'opinion et d'expression. Un contrat doit être honoré. Le président des États-Unis remplit un mandat de 4 ans et ne peut être élu plus de deux fois. Une équipe de baseball comprend neuf joueurs, vous devez toucher chaque base, au bout de trois strikes vous êtes éliminé. Si on vous surprend en train de cambrioler une banque, vous allez en prison.

Quand Mikhaïl Gorbatchev est arrivé au pouvoir, il a ouvert les flux d'informations (glasnost), modifié les règles économiques (perestroïka), et l'Union soviétique a connu un changement extraordinaire.

Les constitutions sont ses exemples parfaits de règles sociales. Les lois physiques telles que le deuxième principe de la thermodynamique sont des règles absolues, que nous les comprenions ou pas, et que nous les aimions ou pas. Les lois, les sanctions, les incitations et les accords sociaux informels sont des règles allant de la plus puissante à la plus faible.

Pour démontrer le pouvoir des règles, j'aime inviter mes étudiants à en inventer de nouvelles pour leur université. Imaginez que les étudiants notent leurs professeurs, ou qu'ils se notent les uns les autres. Imaginez qu'il n'y ait pas de diplôme : vous venez à l'université quand vous voulez apprendre quelque chose, et vous repartez une fois que c'est fait. Imaginez que les professeurs soient titularisés en fonction de leur aptitude à résoudre des problèmes du monde réel, et non à publier des articles. Imaginez que les notes soient attribuées à l'ensemble de la classe et non à chaque individu.

En imaginant une refonte des règles et en réfléchissant à ce qu'elle changerait à nos comportements, nous prenons conscience du pouvoir des règles. Celles-ci constituent des points de levier importants. Avoir la mainmise sur les règles constitue le véritable pouvoir. Voilà pourquoi les lobbyistes se rassemblent lorsque le

Congrès rédige des lois, et pourquoi la Cour suprême, qui interprète et précise la Constitution – à savoir les règles permettant d'édicter les règles –, détient un pouvoir encore supérieur à celui du Congrès. Si vous voulez comprendre les dysfonctionnements profonds d'un système, observez-en les règles et ceux qui les instaurent.

Voilà pourquoi mon intuition systémique a sonné l'alarme lorsqu'on m'a dépeint le nouveau système du commerce mondial. Ses règles sont élaborées par les entreprises, mises en œuvre par les entreprises, au bénéfice des entreprises. En outre, elles excluent quasiment toute rétroaction de quelque autre secteur de la société que ce soit. La plupart des réunions de ses dirigeants sont interdites à quiconque, même à la presse (pas de flux d'informations, pas de rétroaction). Ce système entraîne les nations dans des boucles amplificatrices qui les précipitent vers le bas en les obligeant à affaiblir leurs protections sociales et environnementales pour attirer les investisseurs. C'est le meilleur moyen pour donner libre cours aux boucles du « succès entraînant le succès » qui génèreront d'énormes accumulations de pouvoir et de gigantesques systèmes de planification centralisée voués à s'autodétruire.

4. L'auto-organisation : la capacité d'accroître, de modifier ou de faire évoluer la structure d'un système

La chose la plus étonnante chez les systèmes vivants et certains systèmes sociaux est leur capacité à se transformer radicalement en créant des structures et des comportements totalement nouveaux. En matière de systèmes biologiques, ce pouvoir s'appelle l'évolution. En matière d'économie humaine, on parle de progrès technique ou de révolution sociale. Dans notre jargon systémique, on parle d'auto-organisation.

L'auto-organisation consiste à modifier n'importe quel aspect d'un système situé en moins bonne position sur cette liste – par l'ajout de structures physiques entièrement nouvelles telles que des cerveaux, des ailes ou des ordinateurs – en introduisant de nouvelles boucles régulatrices ou amplificatrices, ou de nouvelles règles. L'aptitude à s'auto-organiser est l'une des formes de résilience systémiques les plus puissantes. Un système capable d'évoluer peut survivre quasiment à tout changement en se transformant lui-même. Le système immunitaire de l'homme a le pouvoir de développer de nouvelles réactions à certains types d'agression qu'il n'a jamais rencontrés auparavant. Le cerveau humain est capable d'intégrer de nouvelles informations et d'en tirer des réflexions totalement inédites.

Le pouvoir d'auto-organisation paraît si extraordinaire que nous avons tendance à le considérer comme mystérieux, miraculeux, providentiel. Les économistes voient souvent la technologie comme quelque chose de magique – venant de nulle part, ne coûtant rien, accroissant chaque année la productivité d'une économie selon un pourcentage stable. Depuis des siècles, les êtres humains considèrent la prodigieuse diversité de la nature avec la même stupeur admirative. Seul un dieu pourrait générer une telle création.

Une étude plus approfondie des systèmes auto-organisateurs révèle que le créateur divin, s'il existe, n'a aucunement besoin de produire des miracles d'évolution. Il suffit qu'il édicte des *règles d'auto-organisation* d'une merveilleuse ingéniosité. Ces règles déterminent ce que le système peut ajouter ou retirer, comment, où et dans quelles conditions. Comme l'ont démontré des centaines de modèles informatiques auto-organisateurs, d'admirables combinaisons complexes peuvent résulter d'un ensemble de règles très simples. Le code génétique enfermé dans l'ADN, qui est à la base de toute évolution biologique, contient seulement quatre lettres différentes combinées en mots de trois lettres. Avec ses règles de réplication et de réarrangement, ce code n'a pas changé depuis environ trois milliards d'années durant lesquelles il a généré une variété inimaginable de créatures qui ont évolué par elles-mêmes, tantôt avec succès, tantôt sans.

L'auto-organisation repose en fait sur une matière première évolutive – un stock extrêmement variable d'informations parmi lesquelles on peut sélectionner et tester des combinaisons – et un moyen d'expérimentation, de sélection et de mise à l'épreuve de nouvelles combinaisons. Dans le cas de l'évolution biologique, la matière première est l'ADN, une source de diversification est la mutation spontanée, et le mécanisme de mise à l'épreuve est un environnement changeant dans lequel certains individus ne survivent pas assez longtemps pour se reproduire. Dans le cas de la technologie, la matière première est l'ensemble des connaissances que la science a accumulées dans les bibliothèques et les cerveaux de ses praticiens. La source de diversification est la créativité humaine (quelle qu'elle soit) et le mécanisme de sélection peut être la réponse du marché, les subventions des gouvernements et des fondations, ou l'adéquation avec les besoins humains.

En prenant la mesure du pouvoir qu'a l'auto-organisation des systèmes, on comprend pourquoi les biologistes vénèrent la biodiversité plus encore que les économistes vénèrent la technologie. Le stock d'ADN, extraordinairement divers, qui a évolué et s'est accumulé durant des milliards d'années, est la source du potentiel évolutionniste, tout comme les bibliothèques, les laboratoires et les universités où les scientifiques se forment sont la source du potentiel technologique. Laisser une espèce s'éteindre est un crime systémique, tout comme le serait l'élimination de tous les exemplaires de certaines revues scientifiques ou de certaines catégories de chercheurs.

Bien entendu, on pourrait dire la même chose des cultures humaines qui constituent une réserve de répertoires comportementaux accumulés depuis des centaines de milliers d'années. Ceux-ci forment un stock d'où peut naître l'évolution sociale. Malheureusement, les gens sont encore moins sensibles au précieux potentiel des cultures qu'à celui de chaque variation génétique de l'écureuil fouisseur. J'imagine que c'est parce que la particularité d'à peu près toutes les cultures est de croire en sa propre supériorité.

Se cantonner à une culture unique empêche l'apprentissage et réduit la résilience. Tout système biologique, économique ou social qui s'encroûte au point d'être incapable d'évoluer par lui-même, qui dénigre systématiquement l'expérimentation et supprime la matière première de l'innovation est voué à l'échec à long terme sur cette planète extrêmement variable.

Le point d'intervention est évident, mais impopulaire. Encourager la variabilité, l'expérimentation et la diversité signifie « perdre le contrôle ». Laissez un millier de fleurs s'épanouir et *tout* pourrait arriver ! Qui veut cela ? Ne prenons aucun risque et poussons le levier dans la mauvaise direction en balayant la diversité biologique, culturelle, sociale et commerciale !

3. L'objectif : le but ou la fonction du système

L'élimination de la diversité résultant de la velléité de contrôle montre pourquoi l'objectif d'un système constitue un point de levier supérieur à sa capacité d'auto-organisation. Si l'objectif est d'amener une part de plus en plus grande du monde sous la férule d'un système particulier de planification centralisée (l'empire de Gengis Khan, l'Église, la République populaire de Chine, Walmart, Disney), tous les éléments figurant à un rang inférieur sur cette liste, les stocks et flux physiques, les boucles de rétroaction, les flux d'informations, et même le comportement auto-organisateur, seront transformés de manière à se conformer à cet objectif.

Voilà pourquoi je ne saurais dire si le génie génétique est une « bonne » ou « mauvaise » chose en soi. Comme pour toutes les technologies, cela dépendra de la personne qui y aura recours, et dans quel but. La seule chose que l'on peut affirmer, c'est que si les entreprises s'en servent dans le but de créer de nouveaux produits commercialisables, l'objectif, le mécanisme de sélection et l'évolution biologique diffèreront totalement de ce que la planète a vu jusqu'ici.

Comme je l'ai montré avec mes exemples de systèmes à boucle unique, la plupart des boucles de rétroaction régulatrices ont leur propre objectif au sein d'un système – maintenir l'eau de la baignoire au bon niveau, la température de la chambre à un niveau agréable, les stocks de produits à un niveau convenable, ou encore conserver suffisamment d'eau derrière un barrage. Ces objectifs constituent des points de levier importants pour certaines parties de système, et la plupart des gens le savent. Si vous voulez avoir plus chaud dans la pièce, vous savez qu'il faut intervenir au niveau du réglage du thermostat. Mais il existe des objectifs plus larges, moins évidents, qui ont davantage de leviers : ceux de l'ensemble du système.

Les personnes au sein du système n'ont elles-mêmes pas souvent conscience de l'objectif global qu'elles servent. « Générer des profits », diraient la plupart des entreprises. Mais ce n'est qu'une règle, une condition nécessaire pour rester en lice. Quel est le but de la compétition ? Croître, augmenter sa part de marché, soumettre le monde (clients, fournisseurs, régulateurs) à un contrôle croissant de l'entreprise afin que ses opérations soient de plus en plus à l'abri de l'incertitude. John Kenneth Galbraith a depuis longtemps mis en évidence cet objectif de l'entreprise – tout engloutir[6]. C'est également le but d'un cancer. En fait, c'est l'objectif de toute population vivante – et pour le pire s'il n'est pas compensé par des boucles régulatrices de niveau supérieur qui ne laisseraient jamais une entité arriviste, animée par une boucle de pouvoir, contrôler le monde. L'objectif de maintien d'un marché concurrentiel doit damer le pion à l'objectif individuel de chaque entreprise d'éliminer ses concurrents, tout comme dans les écosystèmes l'objectif de maintien de l'équilibre et de l'évolution des populations doit prévaloir sur l'objectif de chaque population de se reproduire sans limites.

J'ai dit plus haut que le remplacement des acteurs d'un système constituait une intervention de niveau inférieur si les nouveaux venus s'insèrent dans le même système. Cette règle fait exception au sommet de la hiérarchie, où un seul intervenant a le pouvoir de modifier l'objectif du système. J'ai été fascinée de voir comment – à de très rares occasions – un nouveau dirigeant d'une organisation, de Dartmouth College à l'Allemagne nazie, pouvait prendre son

poste, formuler un nouvel objectif et faire basculer des centaines, des milliers ou des millions de personnes tout à fait rationnelles et intelligentes dans une tout autre direction.

C'est ce qu'a fait Ronald Reagan, comme nous avons pu le constater. Peu de temps avant son arrivée au pouvoir, un président pouvait affirmer « Ne demandez pas ce que votre gouvernement peut faire pour vous, mais ce que vous pouvez faire pour votre gouvernement » sans que personne ne rie. Reagan a quant à lui martelé que l'objectif n'était ni que le peuple vienne en aide au gouvernement, ni que le gouvernement vienne en aide au peuple, mais que le gouvernement nous laisse tranquilles. Certains prétendront, comme moi, que les changements importants apportés au système et l'accroissement du pouvoir des entreprises sur le gouvernement lui ont permis d'arriver à ses fins. Mais la transformation profonde du débat public aux États-Unis et dans le monde depuis Reagan témoigne de l'importante force de levier qu'implique le fait de formuler, donner du sens, répéter, défendre, faire prévaloir de nouveaux objectifs pour un système.

2. Les paradigmes : l'état d'esprit dont découle le système – ses objectifs, sa structure, ses règles, ses délais, ses paramètres

Jay Forrester disait également à propos des systèmes : La manière dont la législation fiscale d'un pays a été rédigée n'a aucune importance. Les membres de la société partagent une même idée de ce qu'est une répartition « équitable » de la charge fiscale. Peu importe ce que dit la loi, qu'elle agisse par des biais justes ou vils, par des complications, des tricheries, des exemptions ou des déductions, par un torpillage permanent des règles, les véritables contributions fiscales iront totalement à l'encontre de l'idée admise d'« équité ».

L'idée partagée par ses membres, les grands présupposés implicites constituent le paradigme d'une société, autrement dit l'ensemble de ses croyances profondes relatives à la manière dont le monde fonctionne. Ces croyances sont implicites parce qu'il n'est pas nécessaire de les exprimer – tout le monde les connaît déjà. L'argent mesure quelque chose de réel et arbore une signification réelle ; par conséquent, les gens qui sont moins payés valent littéralement moins. La croissance est une bonne chose. La nature est un stock de ressources destinées à être transformées à des fins humaines. L'évolution s'est arrêtée avec l'apparition d'*Homo sapiens*. On peut posséder la terre. Voici quelques-uns des présupposés paradigmatiques de notre culture actuelle, qui ont tous sidéré d'autres cultures pour lesquelles ces croyances n'avaient absolument rien d'évident.

Les paradigmes constituent les sources des systèmes. C'est d'eux, des accords sociaux partagés quant à la nature de la réalité, que proviennent les objectifs, les flux d'informations, les rétroactions, les stocks, les flux et tout ce qui a trait aux systèmes. Personne ne l'a mieux exprimé que Ralph Waldo Emerson :

> « Toute nation et tout individu s'entourent immédiatement de l'organisation matérielle qui correspond d'une manière exacte […] à l'état de leur pensée. Voyez comme toute vérité et toute erreur, qui est chacune une *pensée* de quelque esprit d'homme, prend une forme concrète dans la société, les maisons, les villes, le langage, les cérémonies, les journaux. Observez les idées du jour […] ; voyez […] comme les charpentes, les briques, la chaux et la pierre se sont coulées dans le moule voulu, obéissant à l'idée maîtresse qui régnait dans l'esprit de plusieurs. […] Il s'ensuit naturellement que le moindre changement dans l'homme, le moindre élargissement de ses idées […] entraînera les changements les plus frappants dans les choses extérieures[7]. »

Les Égyptiens érigeaient des pyramides parce qu'ils croyaient en l'existence d'une vie après la mort. Nous construisons des gratte-ciel parce que nous croyons qu'en centre-ville les terrains ont énormément de valeur. Que ce soit Copernic et Kepler démontrant que la Terre n'est pas au centre de l'univers, ou Einstein émettant l'hypothèse que matière et énergie sont interchangeables, ou Adam Smith postulant que les comportements égoïstes d'acteurs individuels sur les marchés s'accumulent merveilleusement pour contribuer au bien commun, ceux qui ont pu intervenir dans un système au niveau du paradigme ont enclenché un point de levier susceptible de le transformer radicalement.

Vous pourriez penser que les paradigmes sont les plus difficiles à modifier dans un système, et donc que ce point de levier devrait figurer en dernière position sur cette liste, et non en deuxième. Cependant, le processus de transformation d'un paradigme n'a rien de physique, coûteux ou même lent. Chez un individu, il peut survenir en une milliseconde. Il suffit qu'un déclic se produise dans son esprit, qu'il enlève ses œillères et qu'il voie soudain les choses autrement. C'est bien différent pour une société entière – qui résistera davantage à la modification de ses paradigmes qu'à toute autre chose.

Alors, comment changer de paradigme ? Thomas Kuhn, auteur de l'ouvrage fondateur sur les grands changements de paradigmes de la science, a beaucoup à dire à ce propos[8]. On ne cesse de montrer du doigt les anomalies et les failles de l'ancien paradigme. On parle et on agit continuellement, à voix haute et avec assurance, à partir du nouveau paradigme. On introduit les personnes porteuses du nouveau paradigme dans les lieux de visibilité publique et de pouvoir. On ne perd pas de temps avec les réactionnaires ; on travaille plutôt avec les agents actifs du changement et le vaste milieu des personnes ouvertes d'esprit.

Les modélisateurs systémiques disent que nous changeons de paradigme en élaborant un modèle du système, ce qui nous place hors du système et nous oblige à l'appréhender dans sa totalité.

J'adhère à ce principe, car mes propres paradigmes ont changé de cette manière.

1. Transcender les paradigmes

Au-dessus du changement de paradigme se trouve encore un autre point de levier. Il consiste à rester détaché dans l'arène des paradigmes, à rester souple, à prendre conscience qu'*aucun* paradigme n'est « vrai », que chacun d'eux, y compris celui qui façonne gentiment votre propre vision du monde, constitue une connaissance extrêmement limitée d'un gigantesque et fabuleux univers qui se situe bien au-delà de la compréhension humaine. Ce point de levier consiste à saisir instinctivement le paradigme selon lequel il y a des paradigmes et à comprendre que cela même est un paradigme, et à voir l'ensemble de cette prise de conscience comme irrésistiblement étrange. Il consiste à se laisser aller au non-savoir, à ce que les bouddhistes appellent l'illumination.

Les gens qui s'accrochent aux paradigmes (c'est-à-dire à peu près tout le monde) jettent un regard à la possibilité audacieuse selon laquelle tout ce qu'ils pensent est assurément absurde, et ils pédalent aussitôt dans la direction opposée. Certes, il n'y a aucun pouvoir, aucun contrôle, aucune compréhension, ni même aucune raison d'être, et encore moins d'agir, dans la notion selon laquelle aucune certitude ne réside dans *aucune* vision du monde. Néanmoins, toute personne ayant réussi à entretenir cette idée, pendant un moment ou une vie entière, a constaté qu'elle était à la base d'une autonomisation radicale. Si aucun paradigme ne convient, vous pouvez choisir celui qui vous aidera à atteindre votre but. Si vous n'avez aucune idée de l'objectif à atteindre, vous pouvez écouter l'univers.

C'est dans cet espace de maîtrise des paradigmes que certains se débarrassent de leurs addictions, vivent dans une joie permanente, font tomber des empires, se retrouvent incarcérés, brûlés vifs,

crucifiés ou fusillés, et exercent une influence pendant des millénaires.

Il y aurait tant à dire pour qualifier cette liste de lieux d'intervention dans un système. Elle est provisoire et son ordre est mouvant. Chaque point de levier donne lieu à des exceptions qui peuvent le faire monter ou descendre dans la liste. Le fait que cette dernière ait infusé dans mon subconscient pendant des années ne m'a pas transformée en Superwoman. Plus le point de levier est à un niveau élevé sur la liste, plus le système résistera à sa modification – ce qui explique pourquoi les sociétés se débarrassent souvent des êtres véritablement éclairés.

Les points de levier magiques ne sont pas aisément accessibles, même lorsque nous savons où ils se trouvent et dans quelle direction les entraîner. Il n'y a pas de miracle pour parvenir à les maîtriser. Vous devez y travailler dur, que ce soit en analysant rigoureusement un système ou en vous libérant scrupuleusement de vos propres paradigmes et en vous jetant dans l'humilité du non-savoir. En définitive, il semble que la maîtrise consiste moins à actionner des points de levier qu'à lâcher prise stratégiquement, complètement, follement, et à danser avec le système.

7.
Vivre dans un monde de systèmes

> « Le véritable ennui avec notre monde, ce n'est pas qu'il soit déraisonnable, ni même raisonnable. Ce qu'il y a d'ennuyeux, le plus souvent, c'est qu'il est presque raisonnable, mais pas tout à fait. La vie n'est pas illogique, mais elle est un piège pour logiciens. Elle semble tout juste un peu plus mathématique et normale qu'elle ne l'est. »
> *Gilbert K. Chesterton, 1908*[1]

Les personnes élevées dans le monde industriel qui s'enthousiasment pour la pensée systémique s'exposent à une terrible erreur. Elles supposeront probablement qu'ici, dans l'analyse systémique, dans l'interaction et la complexité, dans la puissance de l'ordinateur, ici, enfin, se trouve la clé de la prédiction et du contrôle. L'erreur est probable car l'état d'esprit du monde industriel suppose qu'il existe une clé à la prédiction et au contrôle.

Je l'ai moi-même supposé dans un premier temps. Nous le supposions tous, nous autres passionnés de systémique étudiant dans la grande institution du Massachusetts Institute of Technology. De façon plus ou moins innocente, enchantés par ce que nous percevions à travers notre nouveau prisme, nous faisions ce que font bien des chercheurs. Nous exagérions nos découvertes. Nous le faisions non pas dans l'intention de tromper autrui, mais dans une manifestation de nos propres attentes et espoirs. Pour nous, la

pensée systémique était plus qu'une gymnastique de l'esprit subtile et complexe. Elle allait *permettre aux systèmes de fonctionner*.

Tels les explorateurs cherchant à rejoindre l'Inde par l'ouest qui découvrirent l'hémisphère occidental, nous avons trouvé quelque chose, mais pas ce que nous pensions avoir trouvé. C'était si différent de ce que nous avions recherché que nous ne savions pas quoi en faire. En nous familiarisant peu à peu avec la pensée systémique, nous nous sommes aperçus qu'elle avait davantage de valeur que nous l'avions cru, mais pas de la manière que nous avions imaginée.

Nous avons reçu notre première leçon en constatant que c'est une chose de trouver comment remédier au dysfonctionnement d'un système, mais que l'application de la solution est une tout autre paire de manches. Nous avons eu de nombreuses discussions sérieuses au sujet de cette « mise en œuvre », expression qui signifiait pour nous « comment faire en sorte que les chefs d'entreprise, les maires et les dirigeants d'organisme suivent nos conseils ».

À vrai dire, *nous* ne suivions pas nos propres conseils. Nous donnions de savantes conférences sur la structure de l'addiction et ne parvenions pas à renoncer au café. Nous savions tout sur la dynamique de l'érosion des objectifs et nous laissions nos propres programmes de footing tomber en déliquescence. Nous avertissions les clients des pièges de l'escalade et du transfert de fardeau, puis nous les tendions dans nos propres mariages.

Les systèmes sociaux sont les manifestations extérieures de schémas de pensée culturels ainsi que de nécessités, d'émotions, de forces et faiblesses humaines profondes. Les transformer n'est pas aussi simple que de dire « terminus, tout le monde descend », ou de faire confiance à celui qui connaît la voie à suivre pour qu'il la suive.

Nous avons rencontré un autre problème. Nos investigations systémiques nous ont permis de comprendre de nombreuses choses que nous n'avions pas saisies auparavant, mais elles ne nous ont pas permis de *tout* comprendre. En fait, elles ont soulevé au moins autant de questions qu'elles en ont résolues. Comme tous les prismes que l'humanité a élaborés pour scruter les macrocosmes et

les microcosmes, celui-ci a révélé de nouvelles choses extraordinaires, dont beaucoup se sont avérées de nouveaux mystères extraordinaires. Les mystères dévoilés par notre nouvel outil se trouvaient notamment dans l'esprit, le cœur et l'âme de l'être humain. Voici quelques-unes des questions suscitées par nos investigations sur le fonctionnement des systèmes.

Une investigation systémique… peut soulever de nouvelles questions !

Une nouvelle boucle de rétroaction introduisant des informations à *tel* endroit du système permettra à ce dernier de fonctionner bien mieux. Mais les décideurs résistent aux informations dont ils ont besoin ! Ils n'y prêtent pas attention, ils n'y croient pas, ils ne savent pas comment les interpréter.	*Pourquoi les gens trient-ils et filtrent-ils activement les informations ? Comment distinguent-ils celles qu'ils laissent entrer de celles qu'ils rejettent, celles qu'ils prennent en compte de celles qu'ils ignorent ou dénigrent ? Comment se fait-il qu'en étant exposé aux mêmes informations, chacun assimile des messages différents et tire des conclusions différentes ?*
Si *telle* boucle de rétroaction était orientée autour de *telle* valeur, le système engendrerait un résultat que tout le monde souhaite. (Pas davantage d'énergie, mais davantage de services énergétiques. Pas le PIB, mais la suffisance matérielle et la sécurité. Pas la croissance, mais le progrès.) Nous n'avons pas besoin de changer les valeurs de quiconque, mais juste de faire en sorte que le système fonctionne selon de véritables valeurs.	*Que sont les valeurs ? D'où viennent-elles ? Sont-elles universelles ou dépendent-elles de la culture ? Pour quelles raisons une personne ou une société renoncent-elles à acquérir de « véritables valeurs » et se rabattent-elles sur des substituts bon marché ? Comment régler une boucle de rétroaction sur des qualités non mesurables plutôt que sur des quantités mesurables ?*
Voici un système pervers à tous égards. Il génère l'inefficacité, la laideur, la dégradation environnementale et la misère humaine. Mais si nous le supprimons, nous n'aurons plus aucun système. Rien n'est plus effrayant. (À l'heure où j'écris, j'ai à l'esprit l'ancien système communiste de l'Union soviétique, mais ce n'est pas le seul exemple possible.)	*Pourquoi les périodes de structuration minimale et de liberté de création maximale sont-elles aussi effrayantes ? Comment se fait-il qu'une façon de voir le monde devienne aussi largement partagée que des institutions, des technologies, des systèmes de production, des bâtiments, des villes s'y conforment ? Comment les systèmes créent-ils des cultures ? Comment les cultures créent-elles des systèmes ? Lorsqu'une culture et un système se révèlent défaillants, leur changement doit-il passer par la destruction et le chaos ?*
Les personnes au sein de ce système supportent un comportement délétère parce qu'elles ont peur du changement. Elles ne croient pas qu'un meilleur système soit possible. Elles ont le sentiment de ne pas être en mesure de réclamer ou de susciter une amélioration.	*Pourquoi les gens se convainquent-ils aussi aisément de leur impuissance ? Pourquoi deviennent-ils aussi pessimistes quant à leur aptitude à réaliser leurs rêves ? Pourquoi sont-ils davantage susceptibles d'écouter ceux qui leur disent qu'ils ne peuvent rien changer ?*

Les penseurs systémiques sont loin d'être les premiers ou les seuls à se poser de telles questions. Quand nous avons commencé à nous les poser, nous avons constaté que des disciplines, des bibliothèques, des histoires entières se posaient les mêmes questions, et y répondaient dans une certaine mesure. Ce qui différenciait notre démarche n'était pas nos réponses, ni même nos questions, mais le fait que l'outil de la pensée systémique, né de l'ingénierie et des mathématiques, mis en œuvre par le biais d'ordinateurs, issu d'un état d'esprit mécaniste et d'une volonté de prédiction et de contrôle, conduit ses praticiens, inexorablement je pense, à se confronter aux mystères les plus profondément humains. La pensée systémique fera comprendre même au plus convaincu des technocrates que pour avancer dans ce monde de systèmes complexes, la technocratie ne suffit pas.

Les systèmes auto-organisateurs non linéaires et soumis à des rétroactions sont par nature imprévisibles. Ils ne peuvent être contrôlés. Ils ne sont compréhensibles que de façon très générale. L'objectif consistant à prévoir le futur avec précision et à s'y préparer à la perfection est irréalisable. Nous ne pouvons obtenir que temporairement, dans le meilleur des cas, qu'un système complexe fasse exactement ce que nous voulons. Nous ne pourrons jamais comprendre entièrement notre monde, pas de la manière dont notre science réductionniste nous a conduits à l'espérer. Notre science elle-même, de la physique quantique à la théorie du chaos, nous mène à une irréductible incertitude. Quel que soit l'objectif, hormis les plus triviaux, nous sommes incapables d'optimiser ; nous ne savons même pas quoi optimiser. Nous ne pouvons tout appréhender. Nous ne pouvons instaurer une relation convenable et durable avec la nature, avec notre prochain ou avec les institutions que nous créons si nous tentons de le faire dans une position de conquérant omniscient.

Si votre identité se résume à ce rôle de conquérant omniscient, vous aurez le plus grand mal à encaisser l'incertitude mise au jour par la pensée systémique. Si vous êtes dans l'incapacité de comprendre, de prédire et de contrôler, que faire ?

Cependant, la pensée systémique nous mène à une autre conclusion qui nous attend, rayonnante, flagrante, dès que nous cessons d'être aveuglés par l'illusion du contrôle. Elle nous dit qu'il y a beaucoup de choses à faire, d'une autre sorte de « faire ». Nous ne pouvons prédire l'avenir, mais nous pouvons l'imaginer et lui donner le jour avec amour. Nous ne pouvons contrôler les systèmes, mais nous pouvons les concevoir et les restructurer. Nous ne pouvons foncer avec certitude dans un monde exempt de surprises, mais nous pouvons nous attendre à des surprises, apprendre d'elles et même en profiter. Nous ne pouvons imposer notre volonté à un système. Nous pouvons écouter ce qu'il nous dit et trouver comment accorder ses propriétés et nos valeurs pour obtenir quelque chose de bien meilleur que notre seule volonté n'aurait jamais produit.

Nous ne pouvons contrôler ni comprendre les systèmes, mais nous pouvons danser avec eux !

D'une certaine manière, je le savais déjà. J'avais eu l'occasion de danser avec des forces supérieures en pratiquant le kayak en eau vive, le jardinage, la musique ou le ski. Toutes ces activités exigeaient de rester en alerte, d'être extrêmement attentif, de s'investir pleinement et de réagir au retour d'information. Mais il ne m'était jamais venu à l'esprit que les mêmes exigences puissent s'appliquer au travail intellectuel, à la gestion d'une entreprise ou d'un pays, ou aux relations personnelles.

Tel est le message qui est ressorti de chacune de nos modélisations informatiques. Vivre dans un monde de systèmes exige de nous davantage qu'une simple aptitude au calcul. Cela nécessite notre humanité pleine et entière – notre rationalité, notre capacité à distinguer le vrai du faux, notre intuition, notre compassion, notre vision et notre moralité[2].

Je terminerai ce livre en tentant de résumer les « sagesses systémiques » les plus générales que j'ai acquises en modélisant des systèmes complexes et en fréquentant les modélisateurs. Ce sont les leçons à retenir, les concepts et pratiques qui imprègnent la discipline des systèmes au point que l'on se met à les respecter non seulement dans sa profession, mais dans sa vie de tous les jours. Ce sont les répercussions comportementales d'une vision du monde

fondée sur les notions de rétroaction, de non-linéarité et de systèmes responsables de notre propre comportement. Quand ce professeur d'ingénierie de Dartmouth a remarqué que nous autres penseurs systémiques étions différents et s'est demandé pourquoi, à mon sens, ce sont ces différences qu'il a repérées.

Cette liste est sans doute incomplète, car je suis encore une étudiante à l'école des systèmes. Et elle n'est pas spécifique à la pensée systémique ;il y a de nombreuses manières d'apprendre à danser. Mais en guise de premier cours de danse, voici les pratiques que je vois mes collègues adopter, consciemment ou non, lorsqu'ils sont confrontés à de nouveaux systèmes.

Sentez le rythme du système

Avant de perturber le système, observez comment il se comporte. S'il s'agit d'un morceau de musique, d'un rapide sur une rivière ou de la fluctuation du prix d'une matière première, étudiez son rythme. S'il s'agit d'un système social, regardez-le fonctionner. Renseignez-vous sur son histoire. Demandez aux personnes qui sont là depuis longtemps de vous raconter ce qui s'est passé. Si possible, trouvez ou réalisez une courbe temporelle des véritables données du système – les souvenirs des gens ne sont pas toujours fiables en termes de chronologie.

Ce conseil est plus important qu'il n'y paraît. Avant de l'avoir mis en pratique, vous n'imaginerez jamais le nombre de mauvais choix qu'il peut vous éviter. Partir du comportement du système vous oblige à vous concentrer sur les faits, et non sur des théories. Cela vous empêche de céder trop rapidement à vos propres croyances ou idées fausses, ou à celles des autres.

Le nombre d'idées fausses qui peuvent circuler est tout à fait incroyable. Par exemple, on vous jure que les précipitations diminuent, mais lorsque vous examinez les données vous découvrez qu'en réalité c'est leur variabilité qui augmente – les sécheresses sont plus prononcées, tout comme les inondations. On m'a affirmé avec le plus bel aplomb que le prix du lait augmentait alors qu'il était en

baisse, que les taux d'intérêt réels diminuaient alors qu'ils étaient en hausse, ou que le déficit représentait une part du PIB plus importante que jamais alors que c'était faux.

Il est particulièrement intéressant d'observer si les différents éléments d'un système varient simultanément ou non. En examinant ce qui se passe réellement au lieu d'écouter ce qu'en disent les gens, on peut faire voler en éclats bien des hypothèses causales irréfléchies. Ainsi, tous les conseillers municipaux du New Hampshire semblent persuadés que la croissance d'une ville entraîne la baisse des impôts. Mais si vous comparez les courbes sur le papier, vous constatez une dispersion aussi aléatoire que les étoiles dans le ciel par une nuit d'hiver en Nouvelle-Angleterre. On ne discerne pas la moindre relation entre ces deux variables.

En partant du comportement du système, nous orientons notre réflexion vers une analyse dynamique, et non statique – en nous demandant non seulement « Qu'est-ce qui cloche ? », mais aussi « Comment en sommes-nous arrivés là ? », « Quels sont les autres comportements envisageables ? », « Si nous ne changeons pas de direction, où nous retrouverons-nous ? ». Et en nous intéressant aux points forts du système, nous pouvons nous demander : « Qu'est-ce qui fonctionne bien ici ? » En commençant par analyser l'évolution de plusieurs variables sur un graphique, nous aurons une idée non seulement des éléments qui constituent le système, mais de la manière dont ils pourraient être reliés.

Enfin, partir de l'historique du système renverse la tendance courante et gênante que nous avons tous à définir un problème non par le comportement réel du système, mais par l'absence de notre solution favorite. (Le problème est qu'il nous faut trouver plus de pétrole. Le problème est que nous avons besoin d'interdire l'avortement. Le problème est que nous n'avons pas suffisamment de vendeurs. Le problème est de trouver comment susciter la croissance dans cette ville.) Écoutez n'importe quelle discussion, au sein de votre famille, lors d'une réunion dans le cadre de votre travail, ou lors d'un débat d'experts à la télévision, et observez comment les protagonistes se précipitent sur des solutions, généralement sur le mode « prédire, contrôler ou imposer sa

volonté », sans avoir prêté la moindre attention à ce que fait le système, et pourquoi.

Exposez vos modèles mentaux à la lumière du jour

Quand nous traçons des diagrammes structurels pour ensuite formuler des équations, nous sommes obligés de rendre nos hypothèses visibles et de les exprimer avec rigueur. Nous devons mettre chacune de nos suppositions relatives au système à la vue de tous (et de nous-mêmes). Nos modèles doivent être complets, exacts et cohérents. Nos hypothèses ne peuvent plus louvoyer (les modèles mentaux sont très versatiles) en supposant une chose dans le cadre d'une discussion, puis son contraire lors de la suivante.

Vous ne devez pas nécessairement présenter votre modèle mental sous forme de diagrammes et d'équations, même si c'est un bon exercice. Vous pouvez le faire à l'aide de mots, de listes, d'images ou de flèches indiquant les éléments que vous estimez reliés. Plus vous le ferez, sous quelque forme que ce soit, plus votre pensée deviendra claire, plus vous reconnaîtrez rapidement vos incertitudes et corrigerez vos erreurs, et plus vous apprendrez à être souple. La souplesse mentale – capacité à redessiner les limites, à remarquer qu'un système est passé dans un nouveau mode, à trouver comment remanier sa structure – est une nécessité quand vous vivez dans un monde de systèmes flexibles.

Ayez toujours à l'esprit que tout ce que vous savez, et tout ce que chacun sait, n'est qu'un modèle. Exposez votre modèle afin qu'il soit vu. Invitez d'autres personnes à remettre en cause vos hypothèses et à ajouter les leurs. Au lieu de devenir le défenseur d'une explication, d'une hypothèse ou d'un modèle envisageable, rassemblez-en le plus possible. Considérez- les tous comme plausibles jusqu'à ce que vous trouviez une preuve vous permettant de supprimer l'un d'eux. Ainsi serez-vous émotionnellement capable de voir la preuve qui

exclut une hypothèse, quand bien même elle aurait maille à partir avec votre propre identité.

Exposer ses modèles au grand jour, les rendre aussi rigoureux que possible, les confronter aux preuves et être prêt à les saborder s'ils n'ont plus de légitimité, ce n'est rien de moins que satisfaire à la méthode scientifique. Or c'est trop rarement le cas, même en sciences, et quasiment jamais en sciences sociales, en management, au sein des gouvernements et dans la vie de tous les jours.

Honorez, respectez et diffusez l'information

Vous avez vu comment l'information maintient la cohésion des systèmes et comment les informations tardives, partiales, éparses ou manquantes peuvent nuire au fonctionnement des boucles de rétroaction. Un décideur est incapable de réagir à une information qu'il n'a pas reçue, de répondre avec précision à une information inexacte ou de réagir à temps à une information qui arrive trop tard. Je suppose que la plupart des problèmes qui surviennent au sein des systèmes sont dus à la partialité, au retard ou à un manque d'informations.

Si je le pouvais, j'ajouterais un onzième commandement aux Tables de la Loi : *Tu ne déformeras pas, ni ne retarderas, ni ne retiendras d'informations*. Vous pouvez rendre un système fou en semant la pagaille dans ses flux d'informations. Inversement, vous pouvez avec une facilité surprenante le rendre plus efficace en lui fournissant des informations plus complètes, plus précises et à point nommé.

Ainsi, en 1986, une nouvelle loi fédérale a imposé à toutes les entreprises états-uniennes de déclarer chaque année tous les polluants dangereux que chacune de leurs usines avait rejetés dans l'atmosphère. Eu égard au Freedom of Information Act (régissant l'accès à l'information, c'est d'un point de vue systémique l'une des lois les plus importantes de la nation), ces informations ont ensuite été soumises à publication officielle. En juillet 1988, les premières données relatives aux émissions chimiques ont été divulguées. Ces

émissions n'avaient rien d'illégal, mais elles faisaient mauvaise impression lorsque des correspondants zélés en rendaient compte dans les journaux locaux avec la fâcheuse habitude de dresser la liste des « dix plus gros pollueurs de la région ». C'est tout ce qui s'est produit. Il n'y a eu ni procès, ni condamnation à réduire les émissions, ni amende, ni sanction. Mais en l'espace de deux ans, les émissions de produits chimiques ont diminué de 40 % à travers le pays (d'après les déclarations du moins, et sans doute également dans les faits). Certaines entreprises ont adopté des politiques visant à réduire leurs émissions de 90 % du simple fait de la divulgation de ces informations auparavant confidentielles[3].

L'information, c'est le pouvoir. Quiconque s'intéresse au pouvoir assimile rapidement cette idée. Les médias, les professionnels des relations publiques, les politiciens et les annonceurs, qui régulent la majeure partie des flux d'informations publiques, détiennent bien plus de pouvoir que la plupart des gens ne le pensent. Ils filtrent et canalisent l'information. Souvent, ils le font dans un but intéressé à court terme. Dans ces conditions, il n'est guère étonnant que nos systèmes sociaux déraillent aussi fréquemment.

Utilisez le langage avec soin et enrichissez-le de concepts systémiques

Nos flux d'informations reposent surtout sur le langage. Nos modèles mentaux sont principalement verbaux. Honorer l'information consiste avant tout à éviter de polluer le langage – en l'utilisant le plus proprement possible. En outre, cela nécessite d'étendre notre langage de manière à pouvoir parler de la complexité.

Dans une revue consacrée à la pensée systémique, Fred Kofman a écrit :

> « Le langage peut servir de médium par lequel nous créons de nouvelles connaissances et de nouvelles réalités en nous mettant

à parler d'elles. En fait, nous ne parlons pas de ce que nous voyons ; *nous voyons seulement ce dont nous pouvons parler*. Nos points de vue sur le monde dépendent de l'interaction entre notre système nerveux et notre langage – qui agissent tous deux en tant que filtres à travers lesquels nous percevons notre monde. […] Les systèmes langagiers et informationnels d'une organisation ne constituent pas un moyen objectif de décrire la réalité extérieure – ils structurent fondamentalement les perceptions et les actions de ses membres. Remanier les systèmes de mesure et de communication d'une [société] revient à remanier toutes les interactions potentielles au niveau le plus fondamental. Le langage […] en tant qu'expression de la réalité est plus primordial que la stratégie, la structure ou […] la culture[4]. »

Une société qui parle en permanence de « productivité », mais qui comprend à peine et emploie moins encore le mot « résilience », deviendra productive et non résiliente. Une société qui ne comprend ni n'utilise le terme de « capacité de charge » outrepassera sa capacité de charge. Une société qui parle de « création d'emplois » comme si les entreprises seules étaient capables de le faire n'incitera pas la grande majorité des gens à créer des emplois pour eux-mêmes ou pour quiconque. Pas plus qu'elle n'appréciera ses travailleurs pour le rôle qu'ils jouent dans la « création de profits ». Et bien sûr une société qui parle de missile « Peacekeeper » (« pacificateur »), de « dommages collatéraux », de « solution finale » ou de « nettoyage ethnique » pratique ce que Wendell Berry appelle le « tyrannien » :

« Il me semble que depuis 150 ans environ, nous assistons à une montée en puissance graduelle d'un langage qui est soit dépourvu de sens, soit destructeur de sens. Et je crois que ce manque croissant de fiabilité du langage est à mettre en parallèle

> avec la désintégration croissante, sur la même période, des personnes et des communautés. […] Dans cette approche dégénérative, le langage est quasiment privé du pouvoir de désignation car il est consciencieusement employé de manière à ne se référer à rien en particulier. L'attention se porte sur les pourcentages, les catégories, les fonctions abstraites. […] Ce n'est vraisemblablement pas le langage qu'on demandera à l'utilisateur de respecter ou sur la base duquel on l'invitera à agir, car celui-ci ne lui fournira aucune raison personnelle de respecter ou d'agir. Sa seule utilité pratique est de soutenir par une "opinion d'expert" une vaste action technologique impersonnelle déjà engagée. […] C'est un langage tyrannique : le tyrannien[5]. »

Pour respecter le langage, il convient en premier lieu de le maintenir aussi concret, significatif et exact que possible – contribuant ainsi en partie à entretenir la clarté des flux d'informations. Dans un second temps, il faut l'élargir afin de l'adapter à notre compréhension plus étendue des systèmes. Si les Esquimaux ont tant de mots pour qualifier la neige, c'est parce qu'ils l'ont étudiée et qu'ils ont appris à l'utiliser. Ils ont fait d'elle une ressource, un système avec lequel ils peuvent danser. La société industrielle commence seulement à avoir et à employer des mots pour qualifier les systèmes, car elle entreprend seulement maintenant de prêter attention et de recourir à la complexité. *Capacité de charge*, *structure*, *diversité* et même *système* sont des termes anciens qui auront désormais des significations plus riches et plus précises. De nouveaux termes doivent également être inventés.

Mon traitement de texte comporte un correcteur d'orthographe me permettant d'ajouter des mots qui ne figuraient pas initialement dans son dictionnaire. Il est intéressant de voir quels termes j'ai dû ajouter en rédigeant ce livre : *feedback, rétrocontrôle, autorenforcement, métaboucle, auto-organisation*.

Prêtez attention à ce qui est important, pas seulement à ce qui est quantifiable

Obsédée par les chiffres, notre culture nous a inculqué l'idée selon laquelle ce qui est mesurable est plus important que ce qui ne l'est pas. Réfléchissez-y un instant. Cela veut dire que nous accordons davantage d'importance à la quantité qu'à la qualité. Si la quantité constitue l'objectif de nos boucles de rétroaction, si la quantité est au centre de notre attention, de notre langage et de nos institutions, si nous nous motivons, nous évaluons et nous récompensons par rapport à notre aptitude à produire de la quantité, alors la quantité sera le résultat. Regardez autour de vous pour savoir si la quantité ou la qualité est la principale caractéristique du monde dans lequel vous vivez.

Nous autres modélisateurs avons subi plus d'une fois les railleries de nos collègues scientifiques lorsque nous introduisons dans nos modèles des variables intitulées « préjugé », « estime de soi » ou « qualité de vie ». Sachant que les ordinateurs ont besoin de données chiffrées, nous avons dû imaginer des échelles quantitatives pour mesurer ces concepts qualitatifs. « Disons que le préjugé varie de – 10 à +10, où 0 signifie que vous ne subissez aucun préjugé, – 10 correspond à un préjugé négatif extrême et +10 à un préjugé si favorable qu'on ne vous soupçonnera jamais de mal faire. Supposons ensuite que l'on vous traite avec un préjugé de – 2, ou +5, ou – 8. Dans chaque cas, en quoi cela influera-t-il sur vos performances professionnelles ? »

D'ailleurs, la relation entre préjugé et performance a déjà fait l'objet d'une modélisation[6]. Cette étude a été réalisée pour une entreprise qui souhaitait savoir comment faire pour mieux traiter ses employés appartenant à des minorités et pour leur permettre de progresser dans la hiérarchie. Toutes les personnes interrogées ont estimé qu'il y avait certainement un véritable lien entre préjugé et performances. Le choix d'une échelle d'évaluation était certes arbitraire – elle aurait aussi bien pu varier de 1 à 5 ou de 0 à 100 – mais il aurait été beaucoup moins scientifique d'exclure le

« préjugé » de l'étude que d'essayer de le prendre en compte. Lorsque les employés de cette entreprise ont tracé, à la demande des chercheurs, la relation entre leurs performances et les préjugés dont ils faisaient l'objet, ils ont obtenu les courbes les moins linéaires que j'ai jamais rencontrées dans un modèle.

Prétendre qu'une chose n'existe pas du simple fait qu'elle est difficile à quantifier mène à des modèles erronés. Nous avons déjà vu le piège systémique qui survient lorsqu'on fixe des objectifs en fonction de ce qui est aisément mesurable au lieu de ce qui est important. Ne tombez pas dans ce travers. L'être humain est doté non seulement de la capacité de compter, mais aussi de l'aptitude à évaluer la qualité. Soyez un détecteur de qualité. Soyez un compteur Geiger ambulant et retentissant qui signale la présence ou l'absence de qualité.

Si une chose est horrible, dites-le. Si quelque chose est vulgaire, inapproprié, hors de proportion, non durable, moralement dégradant, écologiquement destructeur ou humainement avilissant, ne la laissez pas passer. Ne vous faites pas avoir par le stratagème « s'il est impossible de la définir ou de la mesurer, je l'ignore ». Personne ne peut définir ou mesurer la justice, la démocratie, la sécurité, la liberté, la vérité ou l'amour. Personne n'est capable de définir ou mesurer une valeur, quelle qu'elle soit. Mais si personne ne parle en sa faveur, si les systèmes ne sont pas conçus pour la générer, si nous n'en parlons pas et n'attirons pas l'attention sur sa présence ou son absence, elle cessera d'exister.

Élaborez des politiques reposant sur la rétroaction

Le président Jimmy Carter témoignait d'une capacité inhabituelle à réfléchir en termes de rétroaction et à élaborer des politiques fondées sur celle-ci. Malheureusement, il a eu beaucoup de mal à les expliquer à la presse et au public qui ne comprenaient pas le phénomène de rétroaction.

À une époque où les importations de pétrole grimpaient en flèche, il suggéra d'instaurer une taxe proportionnelle à la fraction de consommation américaine devant être importée. Si les importations continuaient à augmenter, la taxe augmenterait jusqu'à ce que la demande s'étouffe, que des substituts fassent leur apparition et que les importations diminuent. Si ces dernières tombaient à zéro, la taxe ferait de même.

Cette mesure n'a jamais été adoptée.

Carter s'efforça également de gérer l'afflux d'immigrants clandestins venant du Mexique. Il avança que rien ne pourrait arrêter cette immigration tant qu'il y aurait un écart aussi important entre les opportunités et niveaux de vie des Américains et des Mexicains. Au lieu de financer des gardes-frontières et des murailles, il proposa de consacrer cet argent à développer l'économie mexicaine jusqu'à ce que l'immigration cesse.

Cela ne s'est jamais produit non plus.

Vous imaginez bien pourquoi un système dynamique rétroactif qui s'autorégule ne peut être régi par une politique statique et inflexible. Il est plus facile, plus efficace et généralement moins onéreux de concevoir des politiques qui évoluent en fonction de l'état du système. Notamment en présence de grandes incertitudes, les meilleures politiques comportent non seulement des boucles de rétroaction, mais des métaboucles de rétroaction – qui modifient, corrigent et élargissent les premières boucles. Ces politiques intègrent l'*apprentissage* dans la conception de leurs processus de gestion.

Un exemple en est le protocole historique de Montréal visant à protéger la couche d'ozone. Lors de sa signature en 1987, il n'y avait aucune certitude quant au danger pour la couche d'ozone, la vitesse à laquelle elle se dégradait ou les répercussions spécifiques aux différentes substances chimiques. Le protocole a fixé des objectifs quant au rythme auquel la production des substances les plus nocives devait être réduite. Mais il prévoyait aussi de surveiller l'évolution de la situation et de réunir un nouveau congrès international afin de modifier le calendrier de suppression des émissions dans le cas où la dégradation de la couche d'ozone

s'avèrerait plus ou moins importante qu'attendu. Trois ans plus tard, en 1990, il a fallu accélérer le rythme de suppression et inclure davantage de substances chimiques, car l'appauvrissement de la couche d'ozone était beaucoup plus important que prévu.

Il s'agit d'une politique basée sur la rétroaction qui est structurée pour l'apprentissage. Nous espérons tous qu'elle a porté ses fruits avec le temps.

Veillez au bien de l'ensemble

Rappelez-vous que la hiérarchie d'un système a pour raison d'être de servir les strates inférieures, et non les strates supérieures. Ne maximisez pas certaines parties du système ou des sous-systèmes en ignorant l'ensemble. Comme l'a dit Kenneth Boulding, ne vous entêtez pas à optimiser une chose qui n'en vaut pas la peine. Efforcez-vous d'améliorer les propriétés de l'ensemble du système telles que la croissance, la stabilité, la diversité, la résilience et la durabilité – qu'elles soient aisément mesurables ou non.

Écoutez la sagesse du système

Aidez et favorisez les forces et structures qui permettent au système d'assurer son propre fonctionnement. Observez combien d'entre elles se trouvent au bas de la hiérarchie. N'intervenez pas sans réfléchir en détruisant les capacités d'autorégulation du système. Avant de foncer tête baissée pour améliorer les choses, prêtez attention à la valeur de ce qui est déjà là.

Nathan Gray, un ami qui a travaillé autrefois dans l'humanitaire au Guatemala, m'a raconté à quel point il était contrarié par les organismes qui arrivaient avec l'intention de « créer des emplois », « accroître les capacités entrepreneuriales » et « attirer les investisseurs extérieurs ». Ils passaient devant le marché local florissant où des commerçants de toutes sortes, du fabricant de paniers au maraîcher, en passant par le boucher et le vendeur de

bonbons, exposaient leurs compétences entrepreneuriales dans le cadre d'emplois qu'ils avaient créés eux-mêmes. Nathan discutait longuement avec ces commerçants, les interrogeant au sujet de leur vie et de leur travail, apprenant ce qui les empêchait d'accroître leur activité et leur revenu. Il en a conclu qu'ils avaient besoin non pas d'investisseurs venant de l'extérieur, mais de l'intérieur. De petits prêts aux taux d'intérêt raisonnables ainsi que des cours d'alphabétisation et de comptabilité seraient beaucoup plus bénéfiques à long terme pour la communauté que d'importer une fabrique ou une usine de montage.

Localisez la responsabilité au sein du système

Ce conseil s'applique aussi bien à l'analyse qu'à la conception d'un système. Dans le cas de l'analyse, il s'agit de rechercher les manières dont le système génère son propre comportement. Prêtez attention aux évènements déclencheurs – influences extérieures qui entraînent un type de comportement plutôt qu'un autre. Il est parfois possible de contrôler ces évènements extérieurs (par exemple en réduisant les pathogènes contenus dans l'eau potable afin de limiter l'incidence des maladies infectieuses). Mais c'est parfois impossible. En outre, il arrive qu'en accusant les influences extérieures ou en nous efforçant de les contrôler, nous occultions le fait qu'il serait plus facile d'accroître la responsabilité au sein du système.

La « responsabilité intrinsèque » signifie que le système est conçu pour fournir aux décideurs une rétroaction directe et rapide quant aux répercussions de leurs choix. Sachant que le pilote d'un avion se trouve aux premières loges, il est intrinsèquement responsable car il ressentira directement les conséquences de ses décisions.

La direction de Dartmouth College a réduit la responsabilité intrinsèque lorsqu'elle a retiré les thermostats des bureaux et des salles de cours pour mettre le contrôle de la température entre les mains d'un ordinateur central. Cette mesure visait à réaliser des économies d'énergie. Depuis ma position au bas de la hiérarchie, j'ai observé comme principale conséquence des oscillations plus importantes de la température ambiante. Quand il faisait trop chaud dans mon bureau, au lieu de baisser le thermostat, je devais appeler un service à l'autre bout du campus, qui procédait au bout de plusieurs heures ou journées à des corrections souvent excessives, si bien que je devais téléphoner à nouveau. Afin de rendre ce système plus responsable, une solution aurait consisté à laisser les professeurs régler leurs thermostats individuels et à leur facturer directement leur consommation d'énergie, privatisant ainsi une ressource commune !

Concevoir un système reposant sur la responsabilité intrinsèque pourrait consister par exemple à exiger de toutes les villes ou entreprises rejetant leurs eaux usées dans une rivière qu'elles prélèvent leur eau potable *en aval* de leurs conduites d'évacuation. Cela pourrait impliquer le refus de prise en charge des frais médicaux résultant de la consommation de tabac, ou d'accident de moto sans port du casque, ou sans port de la ceinture pour un automobiliste. Cela pourrait signifier que le Congrès cesse d'édicter des réglementations dont il s'exempterait lui-même. (Il en existe beaucoup, dont la loi sur la discrimination positive à l'embauche et celle relative à la déclaration d'impact environnemental.) La responsabilisation a été considérablement réduite lorsque les chefs d'État déclarant une guerre n'ont plus été censés mener eux-mêmes les troupes sur le champ de bataille. Et la guerre est devenue plus irresponsable encore lorsque les dirigeants ont eu la possibilité d'appuyer sur un bouton et de causer d'immenses dommages à une telle distance qu'ils n'observeront jamais les dégâts occasionnés.

Selon Garrett Hardin, les personnes souhaitant interdire l'avortement ne feront preuve de responsabilité intrinsèque que lorsqu'elles accepteront d'élever personnellement les enfants des autres qui en résulteront[7] !

Ces quelques exemples suffisent à nous faire prendre conscience à quel point notre culture en est venue à ne guère rechercher la responsabilité au sein du système qui génère une action, et à quel point nous concevons rarement les systèmes de manière à ressentir les conséquences de leurs actions.

Restez humbles, continuez à apprendre

La pensée systémique m'a appris à faire davantage confiance à mon intuition et, dans une moindre mesure, à ma rationalité explicative, à m'appuyer sur les deux autant que possible, tout en me préparant néanmoins aux surprises. Travailler avec les systèmes sur ordinateur, dans la nature, parmi les gens ou dans des organisations me rappelle constamment à quel point mes modèles mentaux sont incomplets, à quel point le monde est complexe et à quel point il y a beaucoup de choses que j'ignore.

La chose à faire quand vous ne savez pas, ce n'est ni de bluffer ni de vous figer, mais d'apprendre. Vous apprendrez en expérimentant – ou comme disait Buckminster Fuller, à coups d'essais et d'erreurs, d'erreurs, d'erreurs. Dans un monde de systèmes complexes, il ne convient pas de foncer en suivant des directives rigides et immuables. Garder le cap est une bonne idée seulement si vous êtes certain d'avoir choisi le bon. Prétendre abusivement que vous maîtrisez les choses, c'est le meilleur moyen non seulement de commettre des erreurs, mais de ne pas apprendre de vos erreurs. Pour apprendre, il convient à l'inverse d'avancer pas à pas, d'observer en permanence et d'être prêt à changer de cap à mesure que vous découvrez où il mène.

C'est difficile. Cela implique de faire des erreurs, et pire, de les admettre. Cela nécessite, comme dit le psychologue Don Michael, d'« embrasser l'erreur ». Il faut beaucoup de courage pour embrasser ses erreurs.

« Ni nous-mêmes, ni nos collègues, ni les publics devant être impliqués […] ne pouvons savoir ce qui se passe et pourrait se

passer si nous agissons comme si nous détenions vraiment les faits, connaissions vraiment tous les problèmes avec certitude, savions exactement quels devraient/pourraient être les résultats, et étions vraiment certains d'être sur le point de parvenir aux résultats les plus souhaités. En outre, lorsque nous abordons des problèmes sociaux complexes, agir comme si nous savions ce que nous faisons réduirait tout simplement notre crédibilité. […] La défiance envers les institutions et les figures d'autorité s'accroît. Le fait même d'admettre l'incertitude pourrait grandement contribuer à inverser cette tendance[8]. »

« Embrasser l'erreur est la condition de l'apprentissage. Cela consiste à chercher et utiliser – et partager – les informations relatives à ce qui a échoué là où vous attendiez ou espériez la réussite. Le fait d'embrasser les erreurs et de vivre avec un haut degré d'incertitude met en évidence notre vulnérabilité personnelle et sociétale. En général, nous dissimulons nos vulnérabilités à nous-mêmes comme aux autres. Mais […] pour être le type de personne qui accepte véritablement sa responsabilité […] il faut connaître et accéder à son moi dans une mesure bien supérieure à celle dont témoignent la plupart des membres de cette société[9]. »

Célébrez la complexité

Regardons les choses en face, l'univers est désordonné. Il est non linéaire, turbulent et dynamique. Il passe son temps à changer de comportement et de trajectoire, et non à maintenir un équilibre mathématiquement précis. Il s'auto-organise et évolue. Il génère la

diversité *et* l'uniformité. Voilà ce qui rend le monde intéressant, magnifique et ce qui lui permet de fonctionner.

Une portion de l'esprit humain est attirée par les lignes droites au lieu des courbes, par les nombres entiers au lieu des fractions, par l'uniformité au lieu de la diversité, et par les certitudes au lieu du mystère. Mais une autre portion témoigne des tendances opposées, car nous avons nous-mêmes évolué par le biais de systèmes de rétroaction complexes, sommes façonnés par eux et structurés en systèmes de ce type. Seule une part de nous, qui a émergé récemment, conçoit les bâtiments sous forme de boîtes aux intransigeantes lignes droites et surfaces plates. Une autre part reconnaît instinctivement que la nature est conçue sous forme de fractales avec des détails fascinants à chaque échelle, du niveau microscopique au macroscopique. Cette part de nous crée les cathédrales gothiques et les tapis persans, les symphonies et les romans, les costumes de carnaval et les programmes d'intelligence artificielle, avec des ornements aussi complexes que ceux du monde qui nous entoure.

Nous avons la capacité, comme le font certains d'entre nous, de célébrer et d'encourager l'auto-organisation, le désordre, la variété et la diversité. Certains en font même leur code moral, à l'instar d'Aldo Leopold avec son éthique de la terre : « Une chose est juste lorsqu'elle tend à préserver l'intégrité, la stabilité et la beauté de la communauté biotique. Elle est injuste lorsqu'elle tend à l'inverse[10]. »

Étendez vos horizons temporels

L'une des pires idées de l'humanité a été d'introduire le taux d'intérêt, lequel a amené les notions de temps de retour sur investissement et de taux d'actualisation. À eux tous, ils procurent une excuse quantitative rationnelle pour ignorer le long terme.

L'horizon temporel officiel de la société industrielle ne va pas au-delà de ce qui se passera à la suite des prochaines élections ou au-delà du temps de retour des investissements actuels. Tandis que l'horizon temporel de la plupart des familles s'étend encore sur une

période plus longue – la durée de vie des enfants ou des petits-enfants. Et parmi les cultures indiennes d'Amérique du Nord, beaucoup tenaient compte des effets de leurs décisions sur les sept générations suivantes. Plus l'horizon temporel à l'œuvre est long, meilleures sont les chances de survie. Ainsi Kenneth Boulding affirme-t-il :

> « Comme le suggèrent de nombreuses preuves historiques, une société qui cesse de s'identifier à sa postérité et qui abandonne son image positive de l'avenir perd aussi sa capacité à gérer les problèmes présents, et elle s'effondre rapidement. […] Il y a toujours eu quelque chose d'assez rassurant dans l'idée que nous devrions vivre comme les oiseaux, et peut-être que la postérité appartient aux oiseaux à plus d'un égard ; peut-être devrions-nous tous […] polluer en nous en donnant à cœur joie. Cependant, en bon vieux partisan du choix de penser au lendemain, je ne peux tout à fait approuver cette solution […][11]. »

Au sens strict de la systémique, il n'y a pas de distinction entre court et long termes. Les phénomènes se produisant à différentes échelles temporelles sont imbriqués les uns dans les autres. Les actions entreprises aujourd'hui entraînent certains effets immédiatement et d'autres au cours des décennies suivantes. Nous ressentons aujourd'hui les conséquences d'actions initiées hier ainsi que des décennies et des siècles auparavant. Les couplages entre processus très rapides et très lents sont parfois forts, parfois faibles. Quand les processus lents dominent, rien ne semble se passer ; quand les processus rapides prennent le dessus, des évènements surviennent à une vitesse époustouflante. Les systèmes ne cessent de coupler et découpler le grand et le petit, le rapide et le lent.

Lorsque vous marchez sur un sentier accidenté, sinueux, inconnu, surprenant et jonché d'obstacles, vous seriez fou de garder la tête baissée pour ne veiller qu'au pas suivant. Vous seriez tout

aussi fou de vous contenter de regarder au loin sans jamais prêter attention à ce qui se trouve immédiatement sous vos pieds. Vous devez surveiller à la fois le court et le long terme – l'ensemble du système.

Défiez les disciplines

Peu importent votre formation, ce que disent les manuels ou les domaines dans lesquels vous pensez être spécialisé, suivez un système, quel que soit l'endroit où il vous mène. Il vous fera sans doute franchir les frontières traditionnelles des disciplines. Pour comprendre ce système, vous devrez être capable d'apprendre auprès d'économistes et de chimistes et de psychologues et de théologiens et d'autres. Vous devrez percer le mystère de leurs jargons, intégrer ce qu'ils vous disent, accepter ce qu'ils peuvent effectivement voir à travers leurs prismes spécifiques et rejeter les distorsions résultant du caractère étroit et incomplet de ces prismes. Ils ne vous faciliteront pas la tâche.

Voir un système dans son ensemble nécessite plus que l'« interdisciplinarité », si ce terme a pour signification, comme c'est généralement le cas, de réunir des gens de différentes disciplines et de les laisser parler les uns après les autres. La communication interdisciplinaire ne fonctionne que s'il y a un problème réel à résoudre, et si les représentants des divers domaines s'attachent davantage à résoudre le problème qu'à être scientifiquement corrects. Ils devront se mettre en mode d'apprentissage. Ils devront admettre leur ignorance et accepter d'apprendre les uns des autres ainsi que du système.

C'est possible. Et c'est tout à fait passionnant quand cela se produit.

Étendez les limites de la bienveillance

Pour bien vivre dans un monde de systèmes complexes, il faut non seulement étendre ses horizons temporels et ses horizons de pensée, mais par-dessus tout ses horizons de bienveillance. Il y a bien sûr des raisons morales à cela. Et si les arguments éthiques ne suffisent pas, la pensée systémique fournit les raisons pratiques de soutenir les raisons morales. Le système réel est interdépendant. Aucune partie de l'espèce humaine n'est distincte ni des autres êtres humains ni de l'écosystème mondial. Dans ce monde intégré, il est impossible que votre cœur se porte comme un charme si vos poumons sont au plus mal, que votre entreprise prospère si vos ouvriers dépérissent, que les riches de Los Angeles réussissent si les pauvres échouent, que l'Europe s'enrichisse si l'Afrique s'appauvrit, ou que l'économie mondiale s'épanouisse si l'environnement mondial périclite.

Comme pour tout ce qui a trait aux systèmes, la plupart des gens ont déjà conscience des interactions qui font que les règles morales et pratiques sont indissociables. Il faut juste qu'ils s'autorisent à croire ce qu'ils savent.

N'érodez pas l'objectif de bonté

L'exemple le plus dommageable de l'archétype systémique de la « dérive des performances » est le processus par lequel la culture industrielle moderne a érodé l'objectif de moralité. Le mécanisme de ce piège est classique, et terrible à voir.

Les exemples de mauvais agissements humains, amplifiés par les médias, consacrés par la culture, sont considérés comme normaux. Il ne faut guère s'en étonner. Après tout, nous sommes humains. Les exemples beaucoup plus nombreux de bonté humaine sont à peine remarqués. Ce sont des « non-évènements ». Ce sont des exceptions. Il devait être un saint. On ne peut pas demander à tout le monde de se comporter ainsi.

Si bien que les attentes sont revues à la baisse. L'écart entre le comportement souhaité et le comportement réel s'amenuise. Peu d'actions sont entreprises pour soutenir et instiller des idéaux. Le

débat public regorge de cynisme. Les dirigeants politiques sont visiblement, effrontément et impunément amoraux ou immoraux. L'idéalisme est tourné en ridicule. Les assertions de croyance morale sont suspectes. Il est bien plus facile de parler en public de la haine que de l'amour. Le naturaliste et critique littéraire Joseph Wook Krutch le formulait ainsi :

> « Bien que l'homme n'ait jamais été aussi satisfait de ce qu'il *possède*, ni aussi confiant dans son aptitude à *réaliser* ce qu'il se met en tête de faire, en même temps il est vrai qu'il n'a jamais accepté auparavant une appréciation aussi basse de ce qu'*il est*. Cette même méthode scientifique qui lui a permis de créer sa richesse et de déployer le pouvoir qu'il détient a, croit-il, permis à la biologie et à la psychologie de l'expliquer lui-même en l'annihilant – ou du moins d'expliquer en l'annihilant tout ce qui paraissait unique, voire mystérieux de quelque manière. […] En dépit de sa richesse et de son pouvoir, il est assurément pauvre en esprit[12]. »

Nous savons quoi faire à propos de la dérive des performances. N'accordez pas davantage d'importance aux mauvaises nouvelles qu'aux bonnes. Et tenez-vous-en à des normes absolues.

La pensée systémique ne peut que nous dire d'agir de la sorte. Elle n'a pas la capacité de le faire. Ainsi revenons-nous à l'écart entre la compréhension et la mise en œuvre. La pensée systémique en elle-même est incapable de réduire cet écart, mais elle peut nous conduire au bout de ce que l'analyse est en mesure de faire, pour ensuite viser au-delà et pointer ce qui peut et doit être réalisé par l'esprit humain.

ANNEXES

Glossaire

Archétype
Structure systémique courante qui induit des schémas comportementaux caractéristiques.

Auto-organisation
Capacité d'un système à se structurer par lui-même, à créer de nouvelles structures, à apprendre ou à se diversifier.

Boucle de rétroaction
Mécanisme (règle, flux d'informations ou signal) par lequel la modification d'un stock affecte un flux entrant ou sortant de ce même stock. Chaîne fermée de liens de causalité qui, par un ensemble de décisions et d'actions dépendant du niveau du stock, modifie ce dernier par le biais d'un flux.

Boucle de rétroaction amplificatrice
Également qualifiée de boucle de rétroaction autorenforcée ou positive, elle amplifie le changement apporté, créant ainsi soit un cercle vicieux, soit un cercle vertueux.

Boucle de rétroaction régulatrice
Boucle stabilisatrice tendant vers un objectif, également qualifiée de boucle de rétroaction négative car elle s'oppose aux changements imposés au système ou les inverse.

Dynamique
Comportement au fil du temps d'un système ou de l'un de ses composants.

Équilibre dynamique
État auquel un système parvient lorsque son stock (son niveau ou sa taille) est stable et constant en dépit des flux entrants et sortants. L'équilibre dynamique ne peut être atteint que si l'ensemble des flux entrants est égal à l'ensemble des flux sortants.

Facteur limitant
Intrant nécessaire qui restreint à lui seul l'activité du système à un moment donné.

Flux
Matières ou informations qui alimentent ou quittent un stock durant une période donnée.

Hiérarchie
Systèmes et sous-systèmes agencés de manière à créer un système plus important. Sous-systèmes au sein d'un système.

Prédominance relative
Changement au fil du temps des forces relatives des différentes boucles de rétroaction en concurrence.

Rationalité limitée
Logique conduisant à des décisions ou à des actions qui sont raisonnables au sein d'une partie d'un système mais ne le sont pas dans un contexte plus large ou lorsqu'elles sont envisagées comme une partie du système élargi.

Relation linéaire
Lien de cause à effet entre deux éléments d'un système dont la proportion est constante, si bien qu'il peut être représenté sur un graphique par une ligne droite. Les effets s'additionnent.

Relation non linéaire
Lien entre deux éléments d'un système lorsque l'effet n'est pas proportionnel à la cause.

Résilience
Capacité d'un système à se remettre d'une perturbation, à se rétablir, à se réparer ou à rebondir à la suite d'un changement occasionné par une force extérieure.

Sous-optimisation
Comportement résultant de la prédominance des objectifs d'un sous-système au détriment de ceux de l'ensemble du système.

Stock
Matières ou informations qui se sont accumulées dans un système au fil du temps.

Système
Ensemble d'éléments ou de parties organisés et reliés entre eux selon une configuration ou structure qui génère un ensemble cohérent de comportements, souvent envisagés comme la « fonction » ou l'« objectif » du système.

Les principes systémiques en bref

Systèmes

• Un système est plus que la somme de ses parties.
• Les interactions au sein d'un système prennent souvent la forme de flux d'informations.
• La composante la moins flagrante du système – sa fonction ou son objectif – détermine souvent son comportement de la manière la plus cruciale.
• La structure d'un système est la source de son comportement, lequel se manifeste par une série d'évènements au fil du temps.

Stocks, flux et équilibre dynamique

• Un stock est le résultat du cumul des variations de flux au cours du temps au sein d'un système.
• Si la somme des flux entrants excède la somme des flux sortants, le niveau du stock augmente.
• Si la somme des flux sortants excède la somme des flux entrants, le niveau du stock diminue.
• Si la somme des flux sortants est égale à la somme des flux entrants, le niveau du stock reste constant ; il est maintenu dans un équilibre dynamique.
• On peut accroître un stock aussi bien en réduisant les flux sortants qu'en augmentant les flux entrants.
• Les stocks font office de temporisateurs, de tampons ou d'absorbeurs de choc au sein d'un système.
• Les stocks permettent de découpler les flux entrants et les flux sortants.

Boucles de rétroaction

• Une boucle de rétroaction est une chaîne fermée de liens de causalité qui, par un ensemble de décisions ou de règles ou de lois physiques ou d'actions dépendant du niveau du stock, modifient ce dernier par le biais d'un flux.
• Tendant vers l'équilibre ou vers un objectif, une boucle de rétroaction régulatrice est à la fois source de stabilité et de résistance au changement.
• Une boucle de rétroaction amplificatrice s'autorenforce, entraînant une croissance exponentielle ou un effondrement majeur avec le temps.
• L'information – physique ou non – qui est délivrée par une boucle de rétroaction affecte uniquement les comportements à venir ; elle ne peut engendrer un signal assez rapidement pour corriger le comportement qui a suscité ce retour d'information.
• L'objectif d'une boucle de rétroaction régulatrice visant le maintien d'un stock doit être déterminé de manière à compenser les flux entrants ou sortants susceptibles d'affecter ce stock. Faute de quoi le processus de rétroaction entraînera le stock en deçà ou au-delà du niveau recherché.
• Les systèmes dotés de structures de rétroaction similaires génèrent des comportements dynamiques similaires.

Prédominance relative, délais et oscillations

• Un système témoigne souvent de comportements complexes lorsque les forces relatives de ses boucles de rétroaction changent, entraînant successivement la prédominance de l'une par rapport à l'autre et inversement.
• Un délai intervenant dans une boucle de rétroaction régulatrice rend le système susceptible d'osciller.
• La modification d'un délai peut entraîner un changement majeur dans le comportement d'un système.

Scénarios et évaluation des modèles

• Les modèles de systèmes dynamiques explore les futurs envisageables en posant la question : « Et si cela se produisait ? »

• L'utilité d'un modèle repose non pas sur le fait que les scénarios qui le sous-tendent soient réalistes (car nul ne peut le savoir avec certitude), mais sur le fait qu'il réponde par un schéma comportemental réaliste.

Limitation des systèmes

• Un système physique qui s'accroît exponentiellement comporte au moins une boucle amplificatrice suscitant la croissance et au moins une boucle régulatrice limitant cette croissance, car aucun système physique ne peut croître éternellement dans un environnement fini.
• Une ressource non renouvelable est limitée par son stock.
• Une ressource renouvelable est limitée par un flux.

Résilience, auto-organisation et hiérarchie

• Il y a toujours des limites à la résilience.
• Un système ne doit pas être géré uniquement en visant sa productivité ou sa stabilité, mais en recherchant également sa résilience.
• Un système possède souvent la propriété d'auto-organisation – l'aptitude à se structurer, à créer de nouvelles structures, à apprendre, à se diversifier et à se complexifier.
• Un système hiérarchique évolue de bas en haut. Les strates supérieures de la hiérarchie ont pour but de servir les objectifs des strates inférieures.

Origines des surprises systémiques

• De nombreuses relations au sein des systèmes sont non linéaires.
• Il n'y a pas de système indépendant. Le monde est un continuum. La délimitation d'un système dépend de l'objectif de l'étude.
• À tout moment, l'intrant le plus important d'un système est celui qui est le plus limitant.
• Toute entité physique soumise à de multiples entrées et sorties est entourée de strates de limites.
• Il y aura toujours des limites à la croissance.
• Lorsqu'une quantité croît exponentiellement vers une limite, elle atteint cette dernière en un laps de temps étonnamment court.

• Lorsqu'un long délai entre en jeu dans une boucle de rétroaction, une certaine anticipation est essentielle.
• Il se peut que la rationalité limitée de chaque acteur d'un système n'entraîne pas des décisions contribuant au bien-être du système dans son ensemble.

État d'esprit et modèles
• Tout ce que nous croyons savoir du monde est un modèle.
• Nos modèles ont une forte congruence avec le monde.
• Nos modèles sont loin de représenter totalement le monde réel.

Tirer parti des pièges systémiques

La résistance aux politiques
Piège : Quand divers acteurs s'efforcent d'influer sur le stock d'un système en fonction d'objectifs divers, il peut en résulter une résistance aux mesures prises. Toute nouvelle mesure, notamment si elle est efficace, ne fait qu'éloigner davantage le stock d'un système des objectifs des autres acteurs tout en générant une résistance supplémentaire, pour aboutir à un résultat qui ne plaît à personne, mais que chacun s'escrime à maintenir en déployant des efforts considérables.
Parade : Laissez faire. Rassemblez tous les acteurs et utilisez l'énergie auparavant consacrée à la résistance pour rechercher des solutions mutuellement satisfaisantes afin que tous les objectifs soient atteints – ou pour redéfinir des objectifs plus globaux et importants vers lesquels tout le monde puisse tendre simultanément.

La tragédie des communs
Piège : Lorsqu'une ressource est commune, chaque usager bénéficie directement de son utilisation tandis que les coûts de son exploitation abusive sont partagés entre tous. Par conséquent, il y a une très faible rétroaction de l'état de la ressource sur les décisions prises par ses utilisateurs. S'ensuit la surexploitation de la ressource qui s'érode jusqu'à ne plus être disponible pour personne.
Parade : Sensibilisez et exhortez les utilisateurs afin qu'ils prennent conscience des répercussions de la surexploitation de la ressource. En outre, restaurez ou renforcez le lien de rétroaction soit en privatisant la ressource afin que chaque utilisateur ressente les conséquences directes de ses abus, soit (sachant que de nombreuses

ressources ne peuvent être privatisées) en régulant l'accès de tous à la ressource.

La dérive des performances
Piège : En laissant les performances antérieures influer sur les normes, notamment lorsqu'elles font l'objet d'un biais de perception négative,
on introduit une boucle de rétroaction amplificatrice d'érosion des objectifs qui fait dériver le système vers des performances inférieures.
Parade : Conservez des normes de performances absolues. Mieux encore, laissez les normes s'élever au niveau des meilleures performances réelles au lieu de s'aligner sur les moins bonnes. Instaurez une dérive vers
de hautes performances !

L'escalade
Piège : Quand l'état d'un stock est déterminé par la tentative de surpasser l'état d'un autre stock – et vice versa –, une boucle de rétroaction amplificatrice entraîne le système dans une course aux armements, une course à la richesse, une campagne de dénigrement, un vacarme croissant, une surenchère de violence. L'escalade étant exponentielle, elle est susceptible de parvenir à des extrêmes dans un délai étonnamment court. Si rien n'est fait, la spirale sera interrompue par l'effondrement d'un acteur – car une croissance exponentielle ne peut se poursuivre indéfiniment.
Parade : Le meilleur moyen d'éviter ce piège est de ne jamais y entrer. Si vous êtes pris dans un système d'escalade, vous pouvez refuser de vous battre (désarmement unilatéral) afin d'interrompre la boucle amplificatrice. Ou vous pouvez négocier l'adoption d'un nouveau système pourvu de boucles régulatrices destinées à contrôler l'escalade.

Le succès va au succès

Piège : Lorsqu'on récompense systématiquement les vainqueurs d'une compétition en leur donnant les moyens de gagner à nouveau, une boucle de rétroaction amplificatrice se met en place. Si on laisse libre cours à cette dernière, les gagnants finiront par tout rafler, et les perdants seront éliminés.
Parade : La diversification permettant à ceux qui sont en train de perdre de quitter le jeu et d'en commencer un autre ; une stricte limitation de la part du gâteau qu'un gagnant peut emporter (lois antitrust) ; des politiques compensant les inégalités en retirant certains avantages aux joueurs les plus forts ou en procurant des avantages aux plus faibles ; des règles récompensant le succès sans influer sur la partie suivante.

Le transfert du fardeau vers l'intervenant
Piège : Le transfert du fardeau, la dépendance et l'addiction surviennent lorsqu'une solution à un problème systémique réduit (ou masque) les symptômes sans rien faire pour résoudre le problème sous-jacent.
Qu'il s'agisse d'une substance qui atténue notre perception des choses ou d'une politique qui dissimule la cause sous-jacente, le remède choisi interfère avec les actions qui pourraient résoudre le véritable problème.
Si l'intervention destinée à corriger le problème génère l'atrophie ou l'érosion de la capacité du système initial à assurer son propre maintien, une boucle d'amplification destructrice se met en branle. Le système se détériore ; il faut recourir de plus en plus à la solution. Ainsi le système devient-il de plus en plus dépendant à l'intervention, et de moins en moins capable de maintenir son propre état désiré.
Parade : Là encore, le meilleur moyen d'échapper à ce piège est de ne pas s'y engager. Méfiez-vous des politiques ou pratiques qui soulagent les symptômes ou ignorent les signaux sans s'atteler véritablement au problème. Au lieu de privilégier les remèdes à court terme, concentrez-vous sur la restructuration à long terme.

Si vous êtes l'intervenant, faites en sorte de restaurer ou de renforcer la capacité du système à résoudre ses problèmes par lui-même, puis retirez-vous. Si vous êtes celui qui souffre d'une dépendance intolérable, rétablissez les capacités de votre système avant de mettre fin à l'intervention. Faites-le immédiatement. Plus vous attendrez, plus le processus de sevrage sera difficile.

Le contournement des règles
Piège : Les règles établies pour encadrer un système sont parfois contournées – comportement pervers qui donne l'impression d'obéir aux règles ou d'atteindre les objectifs, mais qui nuit en réalité au système.
Parade : Concevez ou modifiez les règles de manière à libérer la créativité non pas dans le sens de leur contournement, mais dans celui de l'atteinte de leur but.

La poursuite du mauvais objectif
Piège : Le comportement d'un système est particulièrement sensible aux objectifs des boucles de rétroaction. Si les objectifs – les indicateurs témoignant du respect des règles – sont définis de manière erronée ou incomplète, le système risque de fonctionner docilement pour produire un résultat qui n'est pas réellement visé ou souhaité.
Parade : Déterminez des indicateurs et objectifs qui reflètent le véritable bien-être du système. Veillez en particulier à ne pas confondre l'effort déployé et le résultat ; sinon vous obtiendrez un système qui génère un effort et non un résultat.

Lieux d'intervention dans un système
(par ordre croissant d'efficacité)

12. Les chiffres : les paramètres tels que les subventions, les taxes et les normes

11. Les tampons : la taille des stocks de stabilisation par rapport aux flux associés

10. La structure des stocks et flux : les systèmes physiques et leurs nœuds d'intersection

9. Les délais : la durée par rapport à la vitesse de changement du système

8. Les boucles régulatrices : la force de la rétroaction par rapport à l'impact à corriger

7. Les boucles de rétroaction amplificatrices : la puissance du gain procuré par les boucles de renforcement

6. La structure des flux d'information : qui a et n'a pas accès à l'information

5. Les règles : incitations, sanctions et contraintes

4. L'auto-organisation : la capacité d'accroître, de modifier ou de faire évoluer la structure d'un système

3. L'objectif : le but ou la fonction du système

2. Les paradigmes : l'état d'esprit dont découle le système – ses objectifs, sa structure, ses règles, ses délais, ses paramètres

1. Transcender les paradigmes

Conseils pour vivre dans un monde de systèmes

1. Sentez le rythme du système.

2. Exposez vos modèles mentaux à la lumière du jour.

3. Honorez, respectez et diffusez l'information.

4. Utilisez le langage avec soin et enrichissez-le de concepts systémiques.

5. Prêtez attention à ce qui est important, pas seulement à ce qui est quantifiable.

6. Élaborez des politiques reposant sur la rétroaction.

7. Veillez au bien de l'ensemble.

8. Écoutez la sagesse du système.

9. Localisez la responsabilité au sein du système.

10. Restez humbles, continuez à apprendre.

12. Célébrez la complexité.

13. Étendez vos horizons temporels.

14. Défiez les disciplines.

15. Étendez les limites de la bienveillance.

16. N'érodez pas l'objectif de bonté.

Équations de modélisation

Vous pouvez beaucoup apprendre sur les systèmes sans recourir à un ordinateur. Toutefois, dès que vous commencerez à explorer le comportement de systèmes même très simples, vous éprouverez sans doute le besoin de concevoir vos propres modèles mathématiques. Les modèles présentés dans cet ouvrage ont initialement été élaborés à l'aide du logiciel STELLA distribué par isee systems Inc. (anciennement High Performance Systems). Dans cette section, les équations ont été rédigées de manière à pouvoir aisément être transcrites dans divers logiciels de modélisation tels que Vensim, de Ventana Systems Inc., ou STELLA et iThink, d'isee systems Inc. Les équations suivantes sont celles qui ont été employées pour les neuf modèles dynamiques décrits aux chapitres 1 et 2.
Les « convertisseurs » peuvent être des constantes ou des formules de calcul reposant sur d'autres éléments du modèle systémique. Le temps est abrégé en « *t* », tandis que la variation temporelle entre une donnée et la suivante, ou intervalle de temps, est notée « *dt* ».

Chapitre 1

Baignoire
Figures 5 à 7

• Stock : *eau du bain (t) = eau du bain (t – dt) + (flux entrant – flux sortant)*
x *dt*
• Valeur initiale du stock : *eau du bain* = 200 litres
• *t* = minutes
• *dt* = 1 minute

• Durée d'observation = 10 minutes
• Flux entrant : *flux entrant* = 0 l/min de 0 à 5 minutes ; 20 l/min de 6 à 10 minutes
• Flux sortant : *flux sortant* = 20 l/min

Refroidissement ou réchauffement d'une tasse de café
Figures 10 et 11

Refroidissement
• Stock : *température du café (t) = température du café (t – dt) – (refroidissement* x *dt)*
• Valeur initiale du stock : *température du café* = 100 °C, 80 °C et 60 °C pour trois essais comparatifs du modèle
• *t* = minutes
• *dt* = 1 minute
• Durée d'observation = 8 minutes
• Flux sortant : *refroidissement = écart* x 10 %
• Convertisseurs :
  → *écart = température du café – température ambiante*
  → *température ambiante* = 18 °C

Réchauffement
• Stock : *température du café (t) = température du café (t – dt) + (réchauffement* x *dt)*
• Valeur initiale du stock : *température du café* = 0 °C, 5 °C et 10 °C pour trois essais comparatifs du modèle
• *t* = minutes
• *dt* = 1 minute
• Durée d'observation = 8 minutes
• Flux entrant : *réchauffement = écart* x 10 %
• Convertisseurs :
  → *écart = température ambiante – température du café*
  → *température ambiante* = 18 °C

Compte d'épargne

Figures 12 et 13

• Stock : *solde du compte (t) = solde du compte (t – dt) + (intérêts ajoutés* x *dt)*
• Valeur initiale du stock : *solde du compte* = 100 $
• *t* = années
• *dt* = 1 an
• Durée d'observation = 12 ans
• Flux entrant : *intérêts ajoutés ($/an) = solde du compte* x *taux d'intérêt*
• Convertisseur : *taux d'intérêt* = 2 %, 4 %, 6 %, 8 % et 10 % d'intérêts annuels pour cinq essais comparatifs du modèle

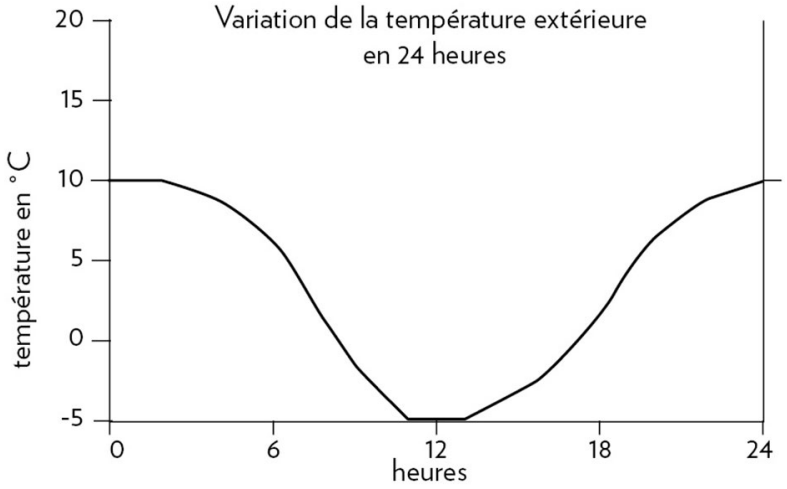
Chapitre 2

Thermostat
Figures 15 à 20

• Stock : *température ambiante (t) = température ambiante (t – dt) + (chaleur de la chaudière – déperdition vers l'extérieur*) x *dt*
• Valeur initiale du stock : *température ambiante* = 10 °C pour le réchauffement d'une pièce froide ; 18 °C pour le refroidissement d'une pièce chaude
• *t* = heures
• *dt* = 1 heure
• Durée d'observation = 8 heures et 24 heures
• Flux entrant : *chaleur de la chaudière* = minimum de *l'écart entre la température souhaitée et la température réelle de la pièce* ou 5
• Flux sortant : *déperdition vers l'extérieur = écart entre la température ambiante et la température extérieure* x 10 % pour une maison « normale » ; *écart entre la température ambiante et la température extérieure* x 30 % pour une maison passoire
• Convertisseurs :
  → *réglage thermostat* = 18 °C
  → *écart entre température souhaitée et température réelle de la pièce* = maximum de (*réglage thermostat – température ambiante*) ou 0

→ *écart entre température ambiante et température extérieure* = *température ambiante* – 10 °C avec une température extérieure constante (figures 16-18) ; *température ambiante – température extérieure sur 24 heures* pour un cycle jour-nuit complet (figures 19 et 20)

→ la *température extérieure sur 24 heures* varie de 18 °C pendant la journée à – 5 °C pendant la nuit, comme indiqué sur le graphique
ci-après.



Population

Figures 21 à 26

- Stock : *population (t)* = *population (t – dt)* + (*naissances – décès*) x *dt*
- Valeur initiale du stock : *population* = 6,6 milliards d'habitants
- *t* = années
- *dt* = 1 an
- Durée d'observation = 100 ans
- Flux entrant : *naissances* = *population* x *natalité*
- Flux sortant : *décès* = *population* x *mortalité*
- Convertisseurs :

  Figure 22 :

  → *mortalité* = 0,009, soit 9 morts pour 1 000 habitants

  → *natalité* = 0,021, soit 21 naissances pour 1 000 habitants

Figure 23 :
→ *mortalité* = 0,030
→ *natalité* = 0,021

Figure 24 :
→ *mortalité* = 0,009
→ La *natalité* diminue de 0,021 à 0,009, comme indiqué sur le graphique ci-après.

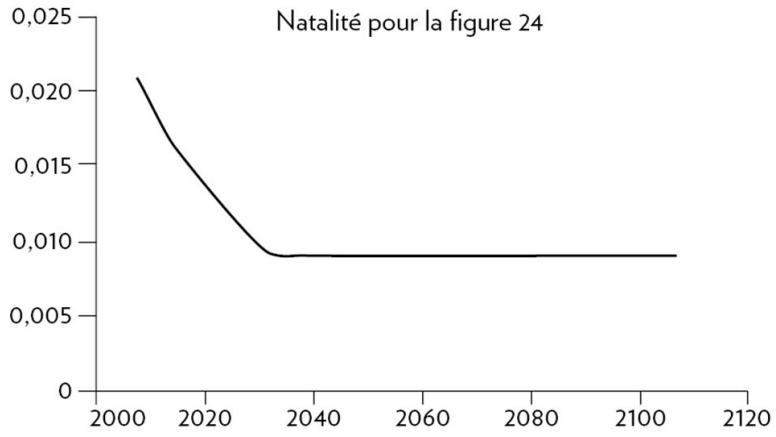
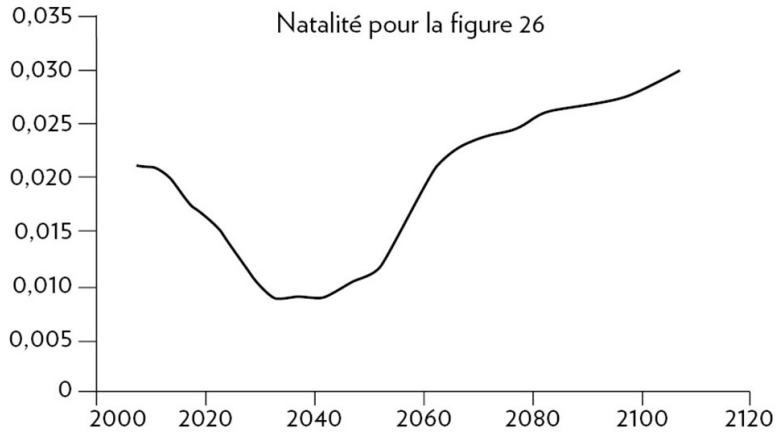


Figure 26 :
→ *mortalité* = 0,009
→ La *natalité* diminue de 0,021 à 0,009, puis remonte jusqu'à 0,030, comme indiqué sur le graphique ci-dessous.



Capital
Figures 27 et 28

- Stock : *capital (t) = capital (t – dt) + (investissement – dépréciation)* x *dt*
- Valeur initiale du stock : *capital* = 100
- *t* = années
- *dt* = 1 an
- Durée d'observation = 50 ans
- Flux entrant : *investissement = production annuelle* x *fraction d'investissement*
- Flux sortant : *dépréciation = capital ÷ durée de vie du capital*
- Convertisseurs :
  → *production annuelle = capital* x *production par unité de capital*
  → *durée de vie du capital* = 10, 15 et 20 ans pour trois essais comparatifs du modèle
  → *fraction d'investissement* = 20 %
  → *production par unité de capital* = 1/3

Stock d'un concessionnaire
Figures 29 à 36

- Stock : *voitures sur le parking (t) = voitures sur le parking (t – dt)*

+ (*livraisons* – *ventes*) x *dt*

- Valeur initiale du stock : *voitures sur le parking* = 200 véhicules
- *t* = jours
- *dt* = 1 jour
- Durée d'observation = 100 jours
- Flux entrant : *livraisons* = 20 de J0 à J5 ; *commandes à l'usine* (*t* – *délai de livraison*) de J6 à J100
- Flux sortant : *ventes* = minimum du *stock de voitures sur le parking* ou *demande clients*
- Convertisseurs :
  → *demande clients* = 20 voitures par jour de J0 à J25 ; 22 voitures par jour de J26 à J100
  → *ventes anticipées* = *ventes* en moyenne glissante sur le *délai d'anticipation* (par exemple, *ventes* lissées sur le *délai d'anticipation*)
  → *stock souhaité* = *ventes anticipées* x 10
  → *écart* = *stock souhaité* – *voitures sur le parking*
  → *commandes usine* = maximum de (*ventes anticipées* + *écart*) ou 0 pour la figure 32 ; maximum de (*ventes anticipées* + *écart* ÷ *délai de réponse*) ou 0 pour les figures 34 à 36

- Délais

  Figure 30 :
  → *délai d'anticipation* = *0*
  → *délai de réponse* = 0
  → *délai de livraison* = 0

  Figure 32 :
  → *délai d'anticipation* = 5 jours
  → *délai de réponse* = 3 jours
  → *délai de livraison* = 5 jours

  Figure 34 :
  → *délai d'anticipation* = 2 jours
  → *délai de réponse* = 3 jours

→ *délai de livraison* = 5 jours

Figure 35 :
→ *délai d'anticipation* = 5 jours
→ *délai de réponse* = 2 jours
→ *délai de livraison* = 5 jours

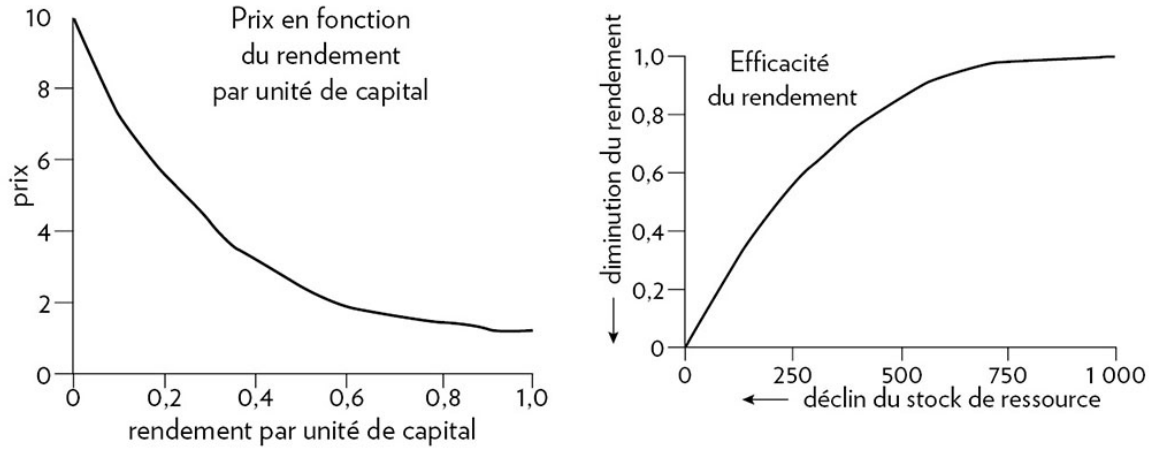
Figure 36 :
→ *délai d'anticipation* = 5 jours
→ *délai de réponse* = 6 jours
→ *délai de livraison* = 5 jours

Stock renouvelable limité par une ressource non renouvelable
Figures 37 à 41

• Stock : *ressource (t) = ressource (t – dt) + (extraction* x *dt*)
• Valeur initiale du stock : *ressource* = 1 000 pour les figures 38, 40 et 41 ; 1 000, 2 000 et 4 000 pour trois essais comparatifs à la figure 39
• Flux sortant : *extraction = capital* x *rendement par unité de capital*
• *t* = années
• *dt* = 1 an
• Durée d'observation = 100 ans
• Stock : *capital (t) = capital (t – dt) + (investissement – dépréciation*) x *dt*
• Valeur initiale du stock : *capital* = 5
• Flux entrant : *investissement* = minimum du *profit* ou de l'*objectif de croissance*
• Flux sortant : *dépréciation = capital ÷ durée de vie du capital*

• Convertisseurs :
→ *durée de vie du capital* = 20 ans
→ *profit* = (*prix* x *extraction*) – (*capital* x 10 %)
→ *objectif de croissance = capital* x 10 % pour les figures 38, 39 et 41 ; *capital* x 1 %, 3 %, 5 % et 7 % pour les quatre essais comparatifs de la figure 40
→ *prix* = 3 pour les figures 38, 39 et 40 ; pour la figure 41, le prix

est d'abord de 1,2 quand le rendement par unité de capital est élevé,
puis il augmente jusqu'à 10 à mesure que le rendement diminue, comme indiqué sur le graphique ci-dessous.
→ le *rendement par unité de capital* commence à 1 quand le stock de ressource est important, puis il diminue jusqu'à 0 à mesure que la ressource décline, comme indiqué sur le graphique ci-dessous.

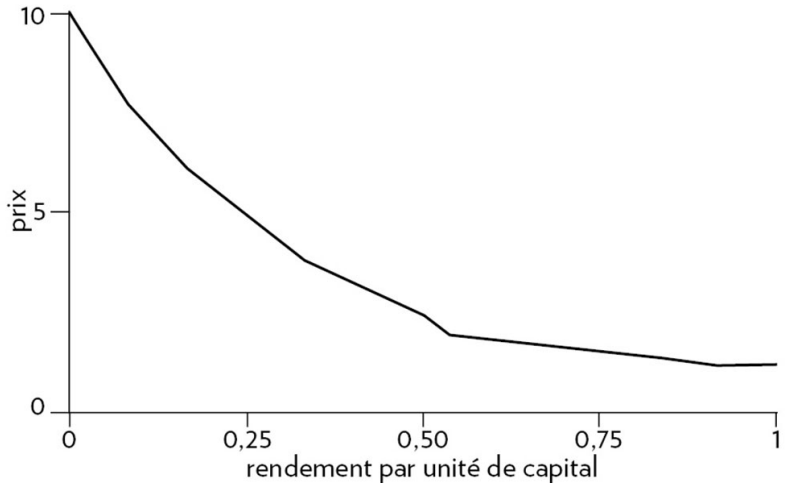


Stock renouvelable limité par une ressource renouvelable
Figures 42 à 45

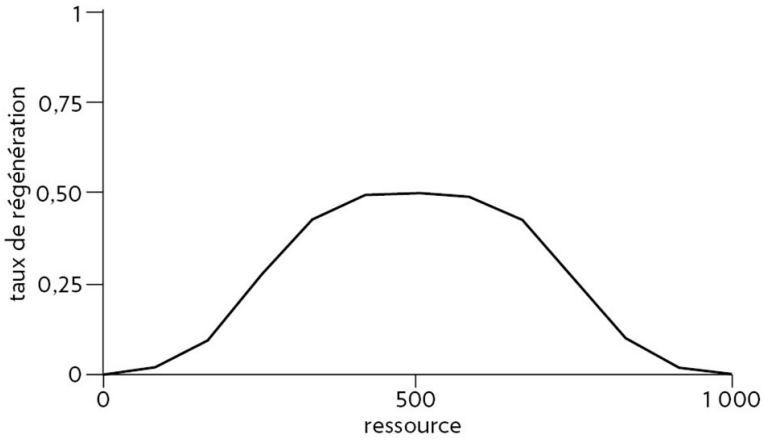
- Stock : *ressource (t) = ressource (t – dt) + (régénération – récolte)* x *dt*
- Valeur initiale du stock : *ressource* = 1 000
- Flux entrant : *régénération = ressource* x *taux de régénération*
- Flux sortant : *récolte = capital* x *rendement par unité de capital*
- *t* = années
- *dt* = 1 an
- Durée d'observation = 100 ans

- Stock : *capital (t) = capital (t – dt) + (investissement – dépréciation)* x *dt*
- Valeur initiale du stock : *capital* = 5
- Flux entrant : *investissement* = minimum du *profit* ou de l'*objectif de croissance*
- Flux sortant : *dépréciation = capital ÷ durée de vie du capital*

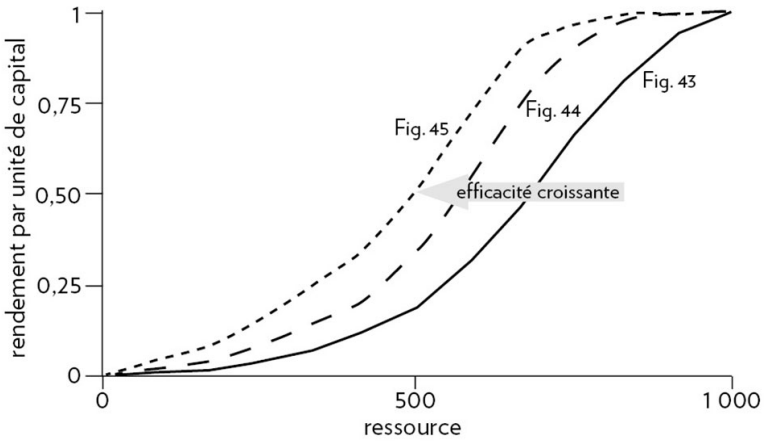
- Convertisseurs :
  → *durée de vie du capital* = 20 ans
  → *objectif de croissance* = *capital* x 10 %
  → *profit* = (*prix* x *récolte*) – *capital*
  → le *prix* est d'abord de 1,2 quand le rendement par unité de capital est élevé, puis il augmente jusqu'à 10 à mesure que le rendement baisse. On observe la même relation non linéaire entre le prix et le rendement que pour le modèle précédent.



  → le *taux de régénération* est nul lorsque la ressource est à son niveau de stock maximal ou lorsqu'elle est complètement épuisée. Quand la ressource est à un niveau moyen, son taux de régénération culmine à près de 0,5.



→ le *rendement par unité de capital* est de 1 lorsque la ressource est à son niveau de stock maximal, mais il décline (non linéairement) à mesure que le stock décline. Globalement, le rendement est le moins efficace à la figure 43, un peu plus à la figure 44 et encore davantage à la figure 45.



Notes

Note de l'éditrice états-unienne

1 Parmi lesquelles Les Limites à la croissance (dans un monde fini) en 2004, publié en français en 2012 dans la collection Initial(e)s DD aux éditions Rue de l'échiquier ; le livre est désormais disponible dans la collection L'écopoche, toujours aux éditions Rue de l'échiquier.

Introduction

1 Russell Ackoff, « The future of operational research is past » *Journal of the Operational Research Society,*, vol. 30, no 2, février 1979, p. 93-104.

2 Idries Shah, *Contes derviches*, traduit de l'anglais par Jean Néaumet, Le Courrier du livre, Paris, 2004, p. 27-28.

Chapitre 1

1 Paul Anderson, cité dans Arthur Koestler, *Le Cheval dans la locomotive. Le paradoxe humain,* traduit de l'anglais par Georges Fradier, Paris, Calmann-Lévy, 1968, p. 61.

2 Ramon Margalef, « Perspectives in ecological theory »,*Coevolution Quarterly*, été 1975, p. 49.

3 Jay W. Forrester, *Industrial dynamics*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1961, p. 15.

4 Honoré de Balzac, *Lettres à l'Étrangère*, 1850.

5 Jan Tinbergen, *Statistical testing of business cycle theories: II – Business cycles in the United States of America*, Agathon Press, New York, 1939, p. 127.

Chapitre 2

1 Albert Einstein, « Sur la méthodologie de la physique théorique », conférence prononcée à Oxford le 10 juin 1933, traduite de l'allemand dans J. Merleau-Ponty et F. Balibar (dir.), Œuvres choisies, t. 5, Seuil/CNRS, 1991, p. 103.

2 Le concept de « zoo systémique » a été inventé par le professeur Harmut Bossel à l'université de Kassel en Allemagne. Ses trois derniers ouvrages relatifs à ce sujet comprennent des descriptions systémiques et des modèles de simulation relatifs à plus de cent « animaux », dont certains figurent ici sous forme modifiée. Hartmut Bossel, *System Zoo Simulation Models*, vol. 1, *Elementary Systems, Physics, Engineering* ; vol. 2, *Climate, Ecosystems, Resources* ; vol. 3, *Economy, Society, Development* –, Norderstedt, Allemagne, Books on Demand, 2007.

3 Pour un modèle plus complet, voir le chapitre « Secteur de la population » dans Dennis L. Meadows *et al.*, *Dynamique de la croissance dans un monde fini*, traduit de l'anglais par François Bertault, Paris, Economica, 1977.

4 Voir un exemple au chapitre 2 de Donella Meadows, Dennis Meadows et Jorgen Randers, *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*, traduit de l'anglais par Agnès El Kaïm, Paris, Rue de l'échiquier, « L'écopoche », 2022.

5 Jay W. Forrester, « The System Dynamics National Model: macrobehavior from microstructure », dans P. M. Milling et E. O. K. Zahn (dir.), *Computer-Based Management of Complex Systems: International System Dynamics Conference*, Berlin, Springer-Verlag, 1989.

Chapitre 3

1 Aldo Leopold, *Round River*, Oxford University Press, New York, 1993.

2 C. S. Holling (dir.), *Adaptive environmental assessment and managemen*t, John Wiley & Sons, Chichester, Royaume-Uni, 1978, p. 34.

3 Ludwig von Bertalanffy, *Les Problèmes de la vie. Essai sur la pensée biologique moderne*, traduit de l'allemand par Michel Deutsch, Gallimard, Paris, 1961, p. 143-144.

4 Jonathan Swift, « Poetry, a Rhapsody », 1733, dans *The Poetical Works of Jonathan Swif*t, Little Brown & Co., Boston, États-Unis, 1959.

5 Paraphrase de Herbert A. Simon, *La Science des systèmes. Science de l'artificiel*, traduit de l'anglais par Jean-Louis Le Moigne, Épi, Paris, 1974, p. 112-120.

Chapitre 4

1 Wendell Berry, *Standing by words*, Washington, D. C., États-Unis, Shoemaker & Hoard, 2005, p. 65.

2 Kenneth Boulding, « General systems as a point of view », dans Mihajlo D. Mesarovic (dir.), *Views on General Systems Theory*, actes du deuxième Systems Symposium, Case Institute of Technology, Cleveland, avril 1963, New York, États-Unis, John Wiley & Sons, 1964.

3 James Gleick, *La Théorie du chaos. Vers une nouvelle science*, traduit de l'anglais par Christian Jeanmougin, Paris, Flammarion, 2021, p. 45-46.

4 Cette étude de cas repose sur la compilation de plusieurs sources : C. S. Holling, « The curious behavior of complex systems: lessons from ecology », dans H. A. Linstone, *Future Research*, Reading, Massachusetts, Addison-Wesley, 1977 ; B. A. Montgomery *et al.*, *The Spruce Budworm Handbook*, Michigan Cooperative Forest Pest Management Program, Handbook 82-7, novembre 1982 ; *The Research News*, University of Michigan, avril-juin 1984 ; Kari Lie, « The spruce budworm controversy in New Brunswick and Nova Scotia », *Alternatives*, vol. 9, n° 2, printemps 1980, p. 5 ; R. F. Morris, « The dynamics of epidemic spruce budworm populations », *Entomological Society of Canada*, n° 31, 1963.

5 Garrett Hardin, « The cybernetics of competition: a biologist's view of society », *Perspectives in Biology and Medicine*, vol. 7, n° 1, 1963, p. 58-84.

6 Jay W. Forrester, *Dynamique urbaine*, traduit de l'anglais par Patrick Sylvestre-Baron, Paris, Economica, 1979, p. 142-143.

7 Václav Havel, discours prononcé lors de son installation comme membre associé étranger à l'Académie des sciences morales et politiques, Institut de France, 27 octobre 1992, https://academiesciencesmoralesetpolitiques.fr/1992/10/27/installation-de-m-vaclav-havel-comme-membre-associe-etranger-au-fauteuil-laisse-vacant-par-le-deces-de-ugo-papi/

8 Dennis L. Meadows, *Dynamics of Commodity Production Cycles*, Cambridge, Massachusetts, Wright-Allen Press, 1970.

9 Adam Smith, *Enquête sur la nature et les causes de la richesse des nations*, traduit de l'anglais par Paulette Taieb, livre IV, ch. 2, Paris, Presses universitaires de France, 1995, p. 512-513.

10 Herman Daly (dir.), *Toward a Steady-State Economy*, San Francisco, W. H. Freeman & Co., 1973, p. 17 ; Herbert Simon, « Theories of bounded rationality », dans R. Radner et C. B. McGuire (dir.), *Decision and*

Organization, Amsterdam, North-Holland Pub. Co., 1972.

11 Herbert Simon a introduit le mot-valise « *satisficing* » (à partir de « *satisfy* » et « *suffice* ») pour désigner le comportement « suffisamment satisfaisant » qui consiste à prendre des décisions pour répondre adéquatement aux besoins plutôt que de s'efforcer de maximiser les résultats eu égard au caractère imparfait des informations. H. Simon, *Models of Man*, New York, Wiley, 1957.

12 Philip G. Zimbardo, « On the ethics of intervention in human psychological research: with special reference to the Stanford prison experiment », *Cognition*, vol. 2, n° 2, 1973, p. 243-256.

13 Cette anecdote m'a été rapportée en 1973 lors d'une conférence à Kollekolle au Danemark.

Chapitre 5

1 John Ralston Saul, paraphrase d'un entretien avec Barry James, « Voltaire's legacy: the cult of the systems man », *International Herald Tribune*, 16 décembre 1992, p. 24.

2 John H. Cushman, Jr, « From Clinton, a flyer on corporate jets? », *International Herald Tribune*, 15 décembre 1992, p. 11.

3 Banque mondiale, *Rapport sur le développement dans le monde 1984*, Paris, Economica, 1984, p. 181 ; Petre Muresan et Ioan M. Copil, « Roumanie », dans Bernard Berelson (dir.), *La Politique démographique des pays développés*, New York, Paris, Population Council, 1974, p. 84-115.

4 Alva Myrdal, *Nation and Family*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1968 (édition originale : New York, Harper & Brothers, 1941).

5 « Germans lose ground on Asylum Pact », *International Herald Tribune*, 15 décembre 1992, p. 5.

6 Garrett Hardin, « The tragedy of the commons », *Science*, vol. 162, n° 3859, 1968, p. 1243-1248, traduit par Laurent Bury dans *La Tragédie des communs*, Paris, PUF, 2018, p. 27-29.

7 Erik Ipsen, « Britain on the skids: a malaise at the top », *International Herald Tribune*, 15 décembre 1992, p. 1.

8 Clyde Haberman, « Israeli soldier kidnapped by Islamic extremists », *International Herald Tribune*, 14 décembre 1992, p. 1.

9 Sylvia Nasar, « Clinton tax plan meets math », *International Herald Tribune*, 14 décembre 1992, p. 15.

10 Voir Jonathan Kozol, *Savage Inequalities: Children in America's Schools*, New York, Crown Publishers, 1991.

11 Cité dans Thomas L. Friedman, « Bill Clinton Live: not just a talk show », *International Herald Tribune*, 16 décembre 1992, p. 6.

12 Keith B. Richburg, « Addiction, Somali-style, worries Marines », *International Herald Tribune*, 15 décembre 1992, p. 2.

13 Bill Waterson, *Calvin et Hobbes*, t. 9, traduit de l'américain par Laurent Duvault, Paris, Hors Collection, 2017, p. 32. Bande dessinée initialement publiée dans l'*International Herald Tribune*, 18 décembre 1992, p. 22.

14 Wouter Tims, « Food, agriculture, and systems analysis », *Options*, Laxenburg, Autriche, International Institute of Applied Systems Analysis, n° 2, 1984, p. 16.

15 « Tokyo cuts outlook on growth to 1.6% », *International Herald Tribune*, 19-20 décembre 1992, p. 11.

16 Robert F. Kennedy, discours à l'université du Kansas, Lawrence, Kansas, 18 mars 1968, JFK Library On-Line, www.jfklibrary.org/Historical+Resources/Archives/Reference+Desk/Speeches/RFK/RFKSpeech68Mar18UKansas.htm

17 Wendell Berry, *Home Economics*, San Francisco, North Point Press, 1987, p. 133.

Chapitre 6

1 Lawrence Malkin, « IBM slashes spending research in new cutback », *International Herald Tribune*, 16 décembre 1992, p. 1.

2 Jay W. Forrester, *Dynamique mondiale*, traduit de l'anglais par Patrick Sylvestre-Baron, Presses universitaires de Lyon, 1982.

3 Jay W. Forrester, *Dynamique urbaine*, *op. cit.*, p. 80-84.

4 Merci à David Holmstrom de Santiago du Chili.

5 Voir le modèle de fluctuation des prix des biens élaboré par Dennis Meadows dans Dennis L. Meadows, *Dynamics of Commodity Production Cycles*, *op. cit.*

6 John Kenneth Galbraith, *Le Nouvel État industriel*, traduit de l'anglais par J.- L. Crémieux-Brilhac et Maurice Le Nan, Paris, Gallimard, 1968.

7 Ralph Waldo Emerson, « La guerre », conférence donnée à Boston en mars 1838, dans *Essais politiques et sociaux*, traduit de l'anglais par Marie Dugard, Paris, Armand Colin, 1912, p. 188-190.

8 Thomas Samuel Kuhn, *La Structure des révolutions scientifiques*, traduit de la 2e édition américaine, Paris, Flammarion, 1972.

Chapitre 7

1 Gilbert Keith Chesterton, *Orthodoxie*, traduit de l'anglais par Lucien d'Azay, Paris, Flammarion, « Climats », 2010, p. 129.

2 Voir un magnifique exemple de la manière dont la pensée systémique peut s'allier aux autres qualités humaines dans le contexte du management dans Peter Senge, Béatrice Arnaud et Alain Gauthier, *La Cinquième Discipline. Levier des organisations apprenantes*, traduit de l'anglais, Paris, Eyrolles, 2015.

3 Philip Abelson, « Major changes in the chemical industry », *Science*, vol. 255, n° 5051, 20 mars 1992, p. 1489.

4 Fred Kofman, « Double-loop accounting: a language for the learning organization », *The Systems Thinker*, vol. 3, n° 1, février 1992.

5 Wendell Berry, *Standing by Words*, *op. cit.*, p. 24 et 52.

6 Cette anecdote m'a été rapportée par Ed Roberts de l'agence Pugh-Roberts Associates.

7 Garrett Hardin, *Exploring New Ethics for Survival: the Voyage of the Spaceship Beagle*, New York, Penguin Books, 1976, p. 107.

8 Donald N. Michael, « Competence and compassion in an age of uncertainty », *World Future Society Bulletin*, janvier-février 1983.

9 Donald N. Michael, cité dans H. A. Linstone et W. H. C. Simmonds (dir.), *Future Research*, Reading, Massachusetts, Addison-Wesley, 1977, p. 98-99.

10 Aldo Leopold, *Almanach d'un comté des sables*, traduit de l'anglais par Anna Gibson, Paris, Aubier, 1995, p. 283.

11 Kenneth Boulding, « The economics of the coming spaceship earth », dans H. Jarrett (dir.), *Environmental Quality in a Growing Economy: Essays from the Sixth Resources for the Future Forum*, Baltimore, Maryland, Johns Hopkins University Press, 1966, p. 11-12.

12 Joseph Wood Krutch, *Human Nature and the Human Condition*, New York, Random House, 1959.

Bibliographie et ressources

Outre les ouvrages cités dans les notes, les ressources mentionnées ci-dessous vous serviront de tremplin dans votre quête de nouvelles manières d'envisager les systèmes. Désormais, les champs de la pensée systémique et de la dynamique des systèmes s'étendent à de nombreuses disciplines.

Pensée systémique et modélisation

Livres

Hartmut Bossel, *Systems and Models: Complexity, Dynamics, Evolution, Sustainability*, Norderstedt, Allemagne, Books on Demand, 2007. Assorti d'une importante bibliographie, ce manuel complet présente les notions et approches fondamentales pour comprendre et modéliser les systèmes complexes qui conditionnent la dynamique de notre monde.

Hartmut Bossel, *System Zoo Simulation Models*, vol. 1 : *Elementary Systems, Physics, Engineering* ; vol. 2, *Climate, Ecosystems, Resources* ; vol. 3,
Economy, Society, Development, Norderstedt, Allemagne, Books on Demand, 2007. Plus d'une centaine de modélisations de systèmes dynamiques provenant de tous les champs de la science, avec une documentation complète des modèles, des résultats, des exercices, ainsi que des modèles de simulation en téléchargement gratuit.

Jay Forrester, *Principes des systèmes*, traduit de l'anglais par P. Sylvestre-Baron, Presses universitaires de Lyon, 1980. Publié pour la première fois en 1968, ce texte marque l'introduction de la dynamique des systèmes.

Ervin Laszlo, *Le Systémisme. Vision nouvelle du monde : pour une philosophie naturelle fondée sur les nouvelles tendances des sciences actuelles*, traduit de l'anglais, Paris, Oxford, New York, Pergamon Press, 1981.
George P. Richardson, *Feedback Thought in Social Science and Systems Theory*, Philadelphie, University of Pennsylvania Press, 1991. La longue et fascinante histoire des concepts de rétroaction dans la théorie sociale.

Linda B. Sweeney et Dennis Meadows, *The Systems Thinking Playbook*, 2001. Trente exercices ludiques illustrant les leçons sur la pensée systémique et les modèles mentaux.

Organisations, sites web, périodiques et logiciels
Creative Learning Exchange. Organisation visant à favoriser le développement de « citoyens systémiques » par le biais de l'éducation des jeunes. Publie une newsletter ainsi que des ouvrages, des jeux et des DVD à l'intention des enseignants et des élèves (en anglais). www.clexchange.org

isee systems, Inc. Distribue les logiciels de modélisation des systèmes dynamiques STELLA et iThink. www.iseesystems.com

System Dynamics Society. Forum international dédié au développement de la pensée systémique et de la dynamique des systèmes à travers le monde, rassemblant chercheurs, éducateurs, étudiants, consultants et praticiens (en anglais). Publie la *System Dynamics Review*. www.systemdynamics.org

The Systems Thinker. Articles, études de cas, guides pratiques, webinaires et outils relatifs à la pensée systémique, élaborés à partir du début des années 1980 (en anglais). www.thesystemsthinker.com

Ventana Systems, Inc. Distribue le logiciel de modélisation des systèmes dynamiques Vensim. www.vensim.com

Pensée systémique et entreprise

Peter Senge, Béatrice Arnaud et Alain Gauthier, *La Cinquième Discipline. Levier des organisations apprenantes*, Paris, Eyrolles, 2015 (première édition chez First en 1991). La pensée systémique dans l'environnement de l'entreprise, ainsi que les outils philosophiques qui naissent de ce mode de réflexion et le complètent, à l'instar de la flexibilité des modèles mentaux et de la vision partagée.

Dennis Sherwood, *Seeing the Forest for the Trees. A manager's Guide to Applying Systems Thinking*, Londres, Nicholas Brealey Publishing, 2002.

John D. Sterman, *Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Boston, Irwin McGraw Hill, 2000.

Pensée systémique et environnement

Andrew Ford, *Modeling the Environment*, Washington, D. C., Island Press, 1999.

Pensée systémique, société et changement social

Joanna Macy, *Mutual Causality in Buddhism and General Systems Theory*, Albany, New York, State University of New York Press, 1991.

Donella H. Meadows, *The Global Citizen*, Washington, D. C., Island Press, 1991.

Remerciements de l'éditrice américaine

De multiples personnes ont contribué à donner le jour à cet ouvrage. Dans son manuscrit original, Donella (Dana) Meadows remerciait tout particulièrement le Balaton Group, le groupe d'analyse des systèmes environnementaux de Kassel, le programme d'études environnementales de Dartmouth College, Ian et Margo Baldwin de Chelsea Green Publishing, Hartmut et Rike Bossel, High Performance Systems (désormais connue sous le nom d'isee systems Inc.), ainsi que de nombreux lecteurs et commentateurs. Elle mentionnait également le rôle de sa « famille agricole élargie », à savoir tous ceux qui ont vécu et travaillé au fil des ans dans sa ferme biologique de Plainfield dans le New Hampshire.

En tant qu'éditrice ayant revu le manuscrit de Dana après sa mort, j'aimerais ajouter d'autres remerciements : Ann et Hans Zulliger de la Foundation for the Third Millennium, ainsi que le conseil d'administration et l'équipe du Sustainability Institute, ont apporté leur soutien et leur enthousiasme à ce projet. Par ailleurs, de nombreux conseillers et critiques ont examiné le texte et les modèles tout en m'aidant à réfléchir à la manière de rendre ce livre utile au monde – Hartmut Bossel, Tom Fiddaman, Chris Soderquist, Phil Rice, Dennis Meadows, Beth Sawin, Helen Whybrow, Jim Schley, Peter Stein, Bert Cohen, Hunter Lovins et les étudiants de la Presidio School of Management en Californie. En outre, toute notre équipe à Chelsea Green a mis la main à la pâte pour faire de ce manuscrit complexe un ouvrage clair. Je les remercie tous de nous avoir aidés à être de meilleurs intendants du foyer qu'est notre planète.

Enfin, je remercie Dana Meadows pour tout ce que j'ai appris d'elle et en éditant son livre.

À propos de l'autrice

Donella Meadows (1941-2001) étudie la chimie avant de soutenir une thèse en biophysique à Harvard. En 1970, elle intègre l'équipe du Massachusetts Institute of Technology dirigée par Dennis Meadows qui développe World3, un modèle numérique explorant la dynamique de la population humaine et de la croissance économique sur une planète finie. En 1972, elle est l'autrice principale de *The Limits to Growth* – ouvrage présentant au grand public les idées issues du projet de modélisation World3. Traduit en 28 langues, il suscite des débats à travers le monde concernant la capacité de charge de la Terre et les choix de l'humanité. Par la suite, Donella Meadows publie neuf autres livres sur la modélisation mondiale et le développement durable, et rédige durant quinze ans une chronique hebdomadaire intitulée « The Global Citizen » dans laquelle elle réfléchit à l'état de notre société et aux interactions complexes du monde.

Elle se voit décerner une bourse Pew de recherche sur la conservation et l'environnement en 1991, puis la bourse MacArthur en 1994. Puis elle fonde en 1996 le Sustainability Institute afin d'appliquer la pensée systémique et l'apprentissage organisationnel aux défis économiques, environnementaux et sociaux. À partir de 1972, et jusqu'à son décès en 2001, elle enseigne à Dartmouth College dans le cadre du cursus d'études environnementales.

POSTFACE
DE BRUNO LHOSTE

Ralentir pour gagner du temps

La multiplicité et la simultanéité des crises que nous avons à résoudre en ce XXIe siècle nous conduisent progressivement à sortir de la pensée « en silo ». Les décideurs appréhendent désormais conjointement les enjeux sociaux, économiques et environnementaux et les liens et les impacts qu'ils peuvent avoir les uns sur les autres. Si l'élargissement des domaines à prendre en compte et le début de compréhension des relations entre des éléments de nature différente modifient nos représentations, nous occultons encore un aspect fondamental des systèmes. Car ceux-ci, comme nous le montre Donella Meadows, ont une double dimension, spatiale et temporelle :

« Nous sommes à chaque fois surpris de voir à quel point les choses prennent du temps. […] Les délais sont omniprésents au sein des systèmes. Chaque stock est un délai. La plupart des flux impliquent des délais. »

Très souvent, les délais sont oubliés ou bien fortement sous-estimés. Or les défis que nous devons relever pour mettre en œuvre la transition écologique regorgent de délais qui retardent les changements et leurs impacts. Nous avons ainsi à reconnaître et tenir

compte de délais de natures différentes : physiques et biologiques, techniques et humains.

Les délais physiques et biologiques éloignent les effets de leurs causes : qu'il s'agisse de bouleversement climatique ou de destruction de la biodiversité, les prises de décision nécessiteraient une forte anticipation. Écoutons Donella :

« Lorsqu'un long délai entre en jeu dans une boucle de rétroaction, une certaine anticipation est essentielle. Se contenter d'agir au moment où le problème devient flagrant reviendrait à manquer une occasion décisive de le résoudre. »

Ces délais s'imposent également dans toutes les filières fondées sur le vivant, dont l'agriculture. Il est difficile d'évaluer rapidement les effets d'un changement de cultures ou de nouvelles pratiques culturales soumises à des cycles de production annuels, mais dont les rotations s'étalent sur trois à cinq ans, voire plus.

Les délais techniques sont omniprésents lorsqu'une filière technologique doit évoluer, qu'un écosystème industriel doit en remplacer un autre, en détruisant au passage une partie du stock de capital. C'est ce qu'est en train de faire l'industrie automobile avec l'électrification : concevoir de nouveaux modèles, créer de nouvelles lignes de production, déployer un réseau de bornes de recharge et produire des batteries ; et même en ce qui concerne la France, extraire du lithium pour assurer l'autonomie d'approvisionnement. Même à marche forcée, les délais se comptent en années.

Mais les délais les plus difficiles à appréhender sont les délais humains, tant individuels que collectifs, qu'il est commun d'oublier ou de sous-estimer. Les normes sociales évoluent au rythme des générations et les changements de comportement sont d'une

complexité qui rend souvent inefficaces les politiques publiques volontaristes.

Il faut enfin prendre en compte dans nos sociétés occidentales le temps de la démocratie qui conduit à de nouveaux délais nécessaires pour informer, débattre et décider collectivement.

Avec l'accélération du bouleversement climatique et la destruction de la biodiversité, il est tentant de vouloir comprimer tous ces délais. Certains préconisent une « économie de guerre climatique » en référence à la réorganisation spectaculairement rapide de l'industrie des États-Unis lors de la Seconde Guerre mondiale. D'autres souhaitent une mise entre parenthèses des processus démocratiques pour imposer des changements décidés par une élite éclairée. S'il ne faut sans doute exclure aucune option dans une crise grave, il est illusoire de penser que l'on pourrait contrôler le temps et les délais dans des systèmes aussi complexes que nos sociétés modernes. Les êtres humains ont une capacité sans limites à faire autre chose que ce que l'on attend d'eux. Un bon début serait déjà de prendre conscience des délais existants dans nos systèmes sociétaux, à la fois dans les stocks et dans les flux, et d'étudier la possibilité de les réduire.

Il existe enfin une manière de dépasser les délais trop contraignants : en ralentissant le système. C'est la recommandation de Donella Meadows :

« Nous disposons d'un levier plus important en freinant le système, afin que les technologies et les prix suivent le rythme, qu'en espérant faire disparaître les délais. »

C’est ce que peut apporter une politique de sobriété à grande échelle, dans toutes ses dimensions : sobriété d’usage, sobriété dimensionnelle et sobriété de mutualisation. Pour reprendre l’exemple de l’industrie automobile, il serait beaucoup plus efficace de la faire muter vers l’électrique en diminuant fortement le nombre de véhicules, en réservant la voiture aux déplacements ne pouvant être réalisés en transports en commun ou en modes actifs, en concevant et construisant des véhicules de taille et de poids raisonnables, en favorisant l’autopartage ou le covoiturage et bien sûr en roulant moins vite !

Ainsi, paradoxalement, c’est en ralentissant nos activités que nous gagnerons du temps, le temps indispensable pour mieux comprendre nos systèmes sociotechniques, identifier les leviers d’action les plus efficients et mettre en œuvre les transformations en tenant vraiment compte de tous les délais.

Bruno Lhoste,
directeur de la collection
« Initial(e)s DD »
et président d’Inddigo

POSTFACE DE BAPTISTE PÉRRISSIN-FABERT

La transition écologique sera systémique ou ne sera pas

« Un système physique qui s'accroît exponentiellement comporte au moins une boucle amplificatrice suscitant la croissance et au moins une boucle régulatrice limitant cette croissance, car aucun système physique ne peut croître éternellement dans un environnement fini. »

Ainsi s'exprime la systémicienne Donella Meadows dans ce lumineux essai étayé de nombreux exemples concrets que nous avons forcément déjà rencontrés dans nos vies personnelles ou professionnelles.

À l'heure des injonctions persistantes à la croissance (des villes, de la production, de la population, etc.), au moment où six des neuf limites planétaires viennent d'être franchies[1], et alors que la masse des machines et des infrastructures du système économique mondial – évaluée à 1 100 milliards de tonnes – aurait dépassé celle de la biomasse terrestre – évaluée à 1 000 milliards de tonnes[2], peut-être devrions-nous aujourd'hui écouter attentivement cet enseignement qui, plus de vingt ans après la disparition de la principale autrice du célèbre ouvrage *Les Limites à la croissance (dans un monde fini)*, semble résonner comme un ultime avertissement.

L'ADEME, en tant qu'acteur public de la transition écologique, entend aujourd'hui tirer pleinement profit de l'ensemble des enseignements de Donella Meadows, à commencer par son référentiel d'analyse et d'évaluation des différents niveaux et points de levier de transformation des systèmes, quels qu'ils soient (collectivités, entreprises, territoires, économies, États). En effet, le présent ouvrage vient opportunément éclairer d'une lumière systémique les actions de l'ADEME qui, depuis sa création en 1992, poursuit une stratégie globale de transformation écologique de la France en agissant à tous les niveaux des systèmes[3].

Reprenons les différents points de levier de transformation des systèmes identifiés par Donella Meadows, en commençant par le niveau des modèles mentaux d'émergence des systèmes, considéré comme le niveau le plus efficace[4]. Ce niveau d'intervention semble trouver sa force dans trois leviers : la capacité à dépasser nos paradigmes et points de vue pour faire émerger une compréhension et une représentation partagées des systèmes à transformer ; ensuite, la capacité à documenter les écueils du paradigme dominant[5] et à en créer de nouveaux plus compatibles avec les limites planétaires ; enfin, la capacité à réenchanter l'objectif de réinscription des systèmes dans un monde fini. Nous pourrions ainsi rapprocher ces trois leviers de l'exercice prospectif de l'ADEME « Transition(s) 2050 », dont le feuilleton « Modes de vie », comme objet de débats publics et matière à délibération collective. Par sa stratégie « grand public », l'ADEME cherche aussi à investir le champ des récits et imaginaires collectifs inspirants comme outil de mobilisation populaire[6] et participe à de multiples évènements professionnels et

citoyens (conférences, tables rondes, webinaires, podcasts, salons, festivals, forums, etc.).

Le deuxième niveau d'intervention dans les systèmes correspond à leur structure organisationnelle et informationnelle. Ici encore, l'ADEME contribue à modifier la structure des systèmes ou à en renforcer la capacité d'auto-organisation et la résilience, que ce soit avec l'eXtrême Défi[7], l'appel à communs Résilience des territoires[8] , la Fabrique des mobilités[9] ou encore le programme Territoire engagé pour la transition écologique[10] , les démarches Trajectoires d'adaptation au changement climatique des territoires (TACCT) [11] et Assessing Low Carbon Transition (ACT)[12] pour accompagner les stratégies de décarbonation des collectivités et des entreprises. L'agence participe également à faire évoluer les règles d'organisation des systèmes en aidant exclusivement des projets dont les ambitions environnementales dépassent celles des lois, normes et règlementations en vigueur, en explorant les nouveaux modèles organisationnels et pratiques sociales avec le dispositif de recherche Transitions énergétiques écologiques et sociales (TEES) ou encore en promouvant les modèles économiques de l'économie circulaire comme l'économie de la fonctionnalité et de la coopération avec le dispositif COOP'TER[13]. Enfin, bien sûr, elle contribue à améliorer la diffusion et la qualité de l'information environnementale à travers la mise à disposition gratuite et en ligne de ses publications[14], en ouvrant l'accès à ses données et à ses outils de sensibilisation et d'aide au passage à l'action grâce à deux portails numériques dédiés[15], en accompagnant la réalisation de bilans carbone et le déploiement d'observatoires, ou encore en éclairant le grand public

et les acteurs économiques sur les différents labels environnementaux existants.

Concernant le troisième niveau d'intervention, celui relatif aux boucles de rétroaction et aux délais à l'intérieur des systèmes, l'ADEME agit tout d'abord pour ralentir les boucles amplificatrices à l'origine des processus d'autorenforcement et d'accélération de l'épuisement des ressources par la promotion d'actions de sobriété à destination des collectivités, des entreprises mais aussi des citoyens sous forme de guides, d'infographies, ainsi que de retours d'expérience exemplaires et inspirants. Elle y participe également par l'accompagnement des démarches de réparation, de réemploi, d'écoconception et de recyclage avec le fonds Économie circulaire qu'elle gère, ou bien en promouvant des programmes de rénovation énergétique des bâtiments[16], en favorisant l'essor de la pratique du vélo, l'usage des mobilités partagées ou encore le déploiement de systèmes sociotechniques soutenables et résilients. L'agence intervient aussi sur le renforcement des boucles de régulation de la consommation de ressources, que ce soit en signalant auprès de l'ARPP[17] les publicités écologiquement mensongères ou en dénonçant le « greenwashing » avec son programme de communication responsable (publicité, marketing, édition, audiovisuel, numérique)[18]. De plus, de manière générale, les subventions octroyées par l'ADEME à ses bénéficiaires ont vocation à être particulièrement efficaces dans la mesure où elles sont accordées dans le cadre réglementaire européen qui vise à ne pas affaiblir la force de régulation attendue des signaux des marchés par le respect du principe de non-distorsion de la concurrence. S'agissant enfin des délais et de leurs effets inertiels dans les systèmes, le

continuum d'interventions de l'agence, depuis la recherche académique avec son programme de financement de thèses jusqu'à la mise sur le marché de l'innovation avec le programme France 2030 qu'elle opère en passant par ses dispositifs d'accompagnement des projets R&D, poursuit bien l'objectif de réduire les délais entre la phase d'idéation et de prototypage et celle de diffusion des innovations technologiques et organisationnelles dans le système socioéconomique et culturel français.

Enfin, l'ADEME intervient sur les paramètres physiques des systèmes, œuvrant à l'optimisation ou à la transformation des flux et stocks physiques avec, par exemple, le fonds Chaleur qui finance le développement des énergies (biomasse, géothermie, solaire thermique, etc.) et des réseaux de chaleur et de froid renouvelables, mais aussi le fonds Économie circulaire pour le déploiement des filières de recyclage ou de l'écologie industrielle et territoriale. L'agence contribue aussi à l'accroissement de la taille des stocks dits « tampons » qui stabilisent les flux des systèmes à travers le financement de capacités de stockage énergétique pour accompagner le développement des énergies intermittentes ou la transformation des chaînes logistiques en processus plus vertueux que le modèle du flux tendu et du juste-à-temps[19].

Ainsi, en totale adéquation avec ce prisme systémique promu par Donella Meadows dans cet ouvrage fondateur, l'ADEME est déterminée à renforcer cette approche dans la conception, la mise en œuvre et l'articulation de ses dispositifs d'accompagnement au plus près des besoins des acteurs du territoire, à l'instar des Programmes d'action de recherche concertés (PARC) qui seront mis en place dans le cadre de sa nouvelle stratégie R&D.

C'est donc avec un immense plaisir que l'ADEME a collaboré avec Rue de l'échiquier pour aboutir à cette belle réalisation éditoriale qui, nous l'espérons, contribuera à rendre la compréhension des comportements dynamiques des systèmes complexes accessible au plus grand nombre. Car il est plus que jamais urgent de déployer en France une culture systémique devenue indispensable pour penser (et vivre !) le monde comme une imbrication toujours plus forte de systèmes et accélérer leur transformation écologique afin de les réinscrire dans les limites planétaires.

Baptiste Pérrissin-Fabert,
directeur général délégué
de l'ADEME

---

1 www.nature.com/articles/s43017-022-00287-8
2 www.nature.com/articles/s41586-020-3010-5
3 www.ademe.fr/lagence/nos-strategies/
4 Vision, raison d'être, valeurs, croyances, objectifs, etc.
5 Notamment le processus « extractivisme / productivisme / consumérisme », le réductionnisme analytique et le solutionnisme technologique.
6 https://librairie.ademe.fr/cadic/7100/des-recits-et-des-actes-011857.pdf ou https://fabriquedesrecits.com/la-fabrique-des-recits/ ou www.atmospheresfestival.com/
7 https://xd.ademe.fr/
8 https://resilience-territoire.ademe.fr/
9 https://lafabriquedesmobilites.fr/
10 https://territoireengagetransitionecologique.ademe.fr/
11 https://tacct.ademe.fr/
12 https://bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil/contenu/index/page/ACT1/siGras/0
13 https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/4795-programme-coop-ter.html
14 https://librairie.ademe.fr/
15 https://data.ademe.fr/ et https://datagir.ademe.fr/
16 Comme le programme PROFEEL (https://programmeprofeel.fr/) ou le programme SARE (www.ecologie.gouv.fr/sare-service-daccompagnement-renovation-energetique).
17 https://www.arpp.org/
18 www.communication-responsable.ademe.fr/
19 www.lafabriquedelalogistique.fr/

À **l'ADEME – l'Agence de la transition écologique –**, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.
Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse. Dans tous les domaines – énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols… –, nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions. À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.
L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, du ministère de la Transition énergétique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

Conception graphique et mise en pages
Thierry Sestier

Relecture
Cyril Léclaircie

Édition
Thomas Bout

Versions numériques réalisées par Flexedo®
www.flexedo.com

This file was downloaded from Z-Library project

Your gateway to knowledge and culture. Accessible for everyone.

z-library.sk z-lib.gs z-lib.fm go-to-library.sk

Official Telegram channel

Z-Access

https://wikipedia.org/wiki/Z-Library